TÉCNICA

REVISTA DE ENGENHARIA
DOS ALUNOS DO I.S.T.

N.º 238-JANEIRO-1954

CIMENTO SECIL

O CIMENTO COM AS MAIORES RESISTÊNCIAS

Fábrica no Outão — Setúbal

Lisboa — Rua do Comércio, 56-3.º

ELECTRO-ARCO
LIMITADA

ELECTRODIOS
POSTOS E ACESSORIOS
PARA A SOLDADURA ELECTRICA

MATERIAL APROVADO PELO
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING

FÁBRICA E LABORATÓRIOS
VENDA NOVA — AMADORA
LISBOA
RUA SILVA CARVALHO, 239 — TEL 63649
PORTO
RUA DO BOLHÃO, 216 — TEL 21277

Cimento «Liz» hidrofugado «N»

PRÓPRIO PARA

IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS

REBOCOS, FUNDAÇÕES, PAREDES, ETC.

Substitue com vantagem de ordem técnica e económica todos os impermeabilizadores conhecidos.

Em sacos de papel de 50 quilos

Peçam instruções para o seu emprêgo

Sede: Rua do Cais de Santarém, 64, 1.º — LISBOA
Filial: Rua de Santo António, 190-A, 1.º — PORTO

Agentes em todo o País

TÉCNICA

REVISTA DE ENGENHARIA DOS ALUNOS DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Ano XXIX - N.º 238 Janeiro de 1954

Redacção e Administração: AVENIDA ROVISCO PAIS, I.S.T. * LISBOA-N. * TELEF. 70144 (Linha 50)

DIRECTOR
JOSÉ MANUEL DA CRUZ MORAIS

ADMINISTRADOR
FERNANDO MARQUES DE OLIVEIRA

SECRETARIO
VIRGÍLIO DOS REIS CARDOSO IGREJA

CORPO REDACTORIAL
ANTÓNIO SEVERINO PINTO
CARLOS M. NOGUEIRA MARTINS
JOSÉ M. FREITAS CRUZ
JOÃO PEDRO ANTUNES GOMES
LUIZ F. LUCENA FERREIRA

NUMERO AVULSO 12$50

ASSINATURAS:

	3 N.os	5 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	32$50	50$00	95$00
Colónias Portuguesas e Estrangeiro	—	55$00	100$00

EDITOR E PROPRIETÁRIO
ASS. DOS ESTUD. DO I.S.T.

COMPOSTO E IMPRESSO
NA
Tip. JORGE FERNANDES, L.DA
RUA CRUZ DOS POIAIS, 103
LISBOA

SUMÁRIO

CAPA — Transformador trifásico, em óleo. 1 100 kVA, 30 kV ± 5 %/6 kV. Fabricado pela Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas (EFA) e instalado na Base Naval do Alfeite.

Págs

Alguns aspectos da técnica do fabrico do cimento Portland
Pelo Eng.º Civil (E. P. U. L.) José Osório da Rocha e Melo. . . 175

Notas informativas — **Elementos sobre a produção e consumo de energia na rede eléctrica nacional** 198

A Mecânica dos Solos: seu papel na Engenharia Civil
Pelo Eng.º Manuel Rocha 199

Appareils modernes de compteurs d'énergie électrique pour consommateurs importants
Por Monsieur de Vittorelli 235

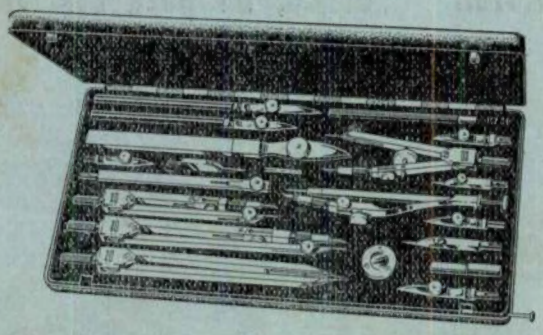
Do Mundo Técnico 246

Biblioteca 249

OS ARTIGOS PUBLICADOS NESTA REVISTA SÃO DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDADE DOS AUTORES

FUNDAÇÕES FRANKI
SOCIEDADE CONSTRUTORA PORTUGUESA, L.DA
TELEF. 76061
PRAÇA DO AREEIRO, 9, 4.º-ESQ.
LISBOA

WILD
HEERBRUGG



A base de todo o trabalho técnico é um desenho preciso. Para ocorrer às necessidades sempre crescentes neste campo, criou-se um nóvo tipo de ferramentas para desenho, construídas de ***aço inoxidável.***

Este material, mais rígido e resistente do que o "maillechort", é 5 vezes mais duro do que o latão. Nem as acções mecânicas, nem a transpiração, nem a humidade podem alterar o seu aspecto com o tempo ou com o uso.

Precisão duradoura, para estímulo e prazer no trabalho, é dada pelos

ESTOJOS WILD PARA DESENHO

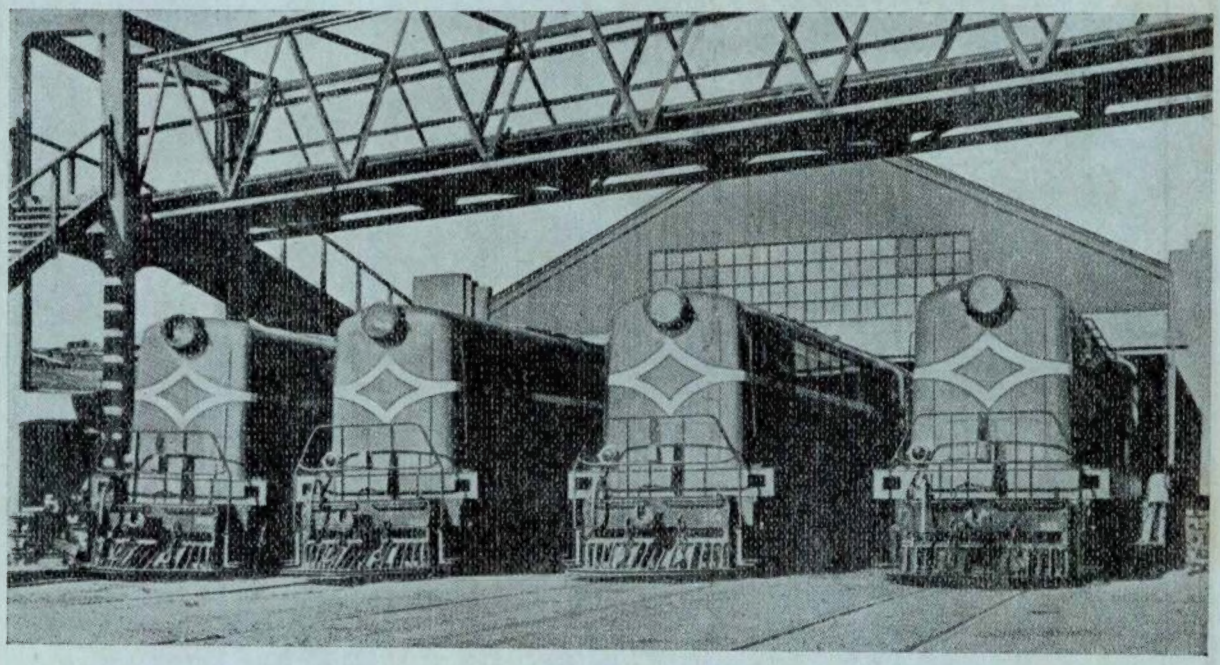
COM PEÇAS DE AÇO INOXIDÁVEL

À venda nas boas Papelarias do país.
Catálogos e preços nos Representantes-Depositários:

PIMENTEL & CASQUILHO, L.DA
Rua do Jardim do Regedor, 24-2.° • LISBOA

'ENGLISH ELECTRIC'

LOCOMOTIVAS PARA A LINHA WELLINGTON — UPPER, na Nova Zelândia



Quatro das 15 locomotivas Diesel-Eléctricas de 600 H. P. fornecidas pela «The English Electric Co., Ltd.» aos Caminhos de Ferro da Nova Zelândia.

THE ENGLISH ELECTRIC COMPANY LIMITED

Queens House, Kingsway, London W. C. 2.

Fábricas em Stafford, Preston, Rugby, Bradford e Liverpool

REPRESENTANTES:

MONTEIRO GOMES, LIMITADA

Rua Cascais, 47 — LISBOA — Tel. 37083

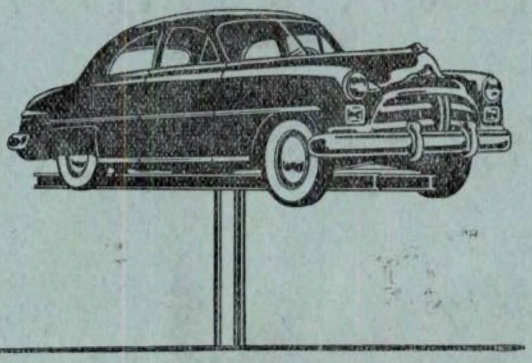
Material de Estação de Serviço

Elevadores hidráulicos

Compressores

Máquinas de lavar

Material de lubrificação



Balanças de ar

Mangueiras, tomadas de ar e acessórios

Macacos hidráulicos, rolantes, etc., etc.

Estudos e Projectos de Estações de Serviço

JANSON, L.DA

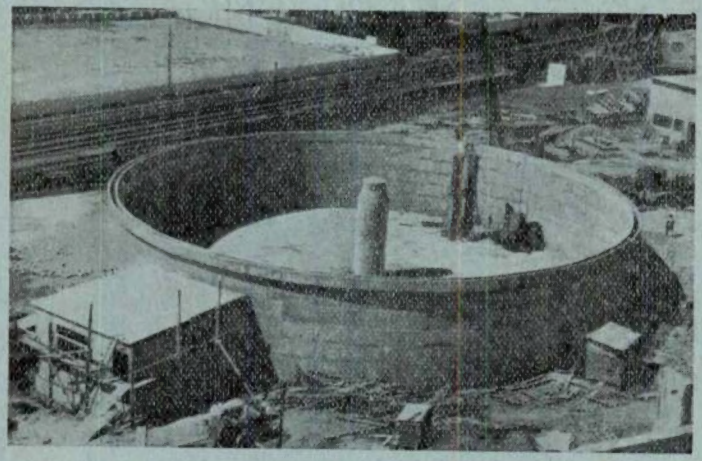
Rua D. Filipa de Vilhena, 10

LISBOA

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, L.DA

Praça do Município, 13-3.º — LISBOA

Telefone 2 2344



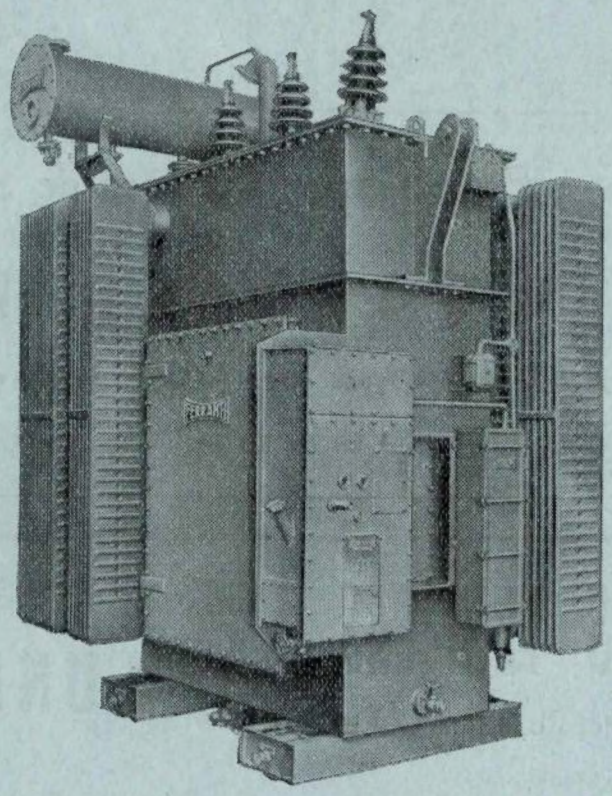
C. "CIMENTO TEJO" — TANQUE DE PASTA, EM ALHANDRA

FUNDAÇÕES

BETÃO ARMADO

OBRAS PÚBLICAS

PREFERIR FERRANTI É SABER ESCOLHER



TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA
AUTO-TRANSFORMADORES
REGULADORES DA VOLTAGEM

REPRESENTANTES

C. SANTOS LDA.

29, Avenida da Liberdade, 41

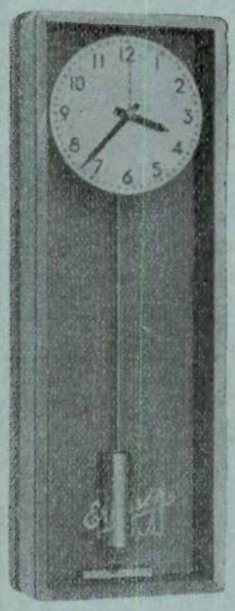
DIVISÃO MARÍTIMA E TÉCNICA

17, Travessa da Glória, 19-A — LISBOA

PENSE em Ericsson

quando a hora certa é um problema!

Nos Escritórios, Fábricas, Colégios, Quartéis, Estações de Embarque de Passageiros, Casas de Saúde, Repartições Públicas, o SISTEMA ERICSSON auto-regulado resolve o problema da hora certa e uniforme.



- **Relógio MESTRE Ericsson.**
- **Relógios Ericsson para contrôle de ponto.**
- **Relógios secundários Ericsson.**
- **Dispositivo para programas de sinalização.**

Outros produtos Ericsson:

- Sistemas telefónicos de todos os tipos
- Sistemas de telesinalização
- Sistemas de radiocomunicações e sonorização
- Diversa aparelhagem telefónica e eléctrica

SOCIEDADE ERICSSON DE PORTUGAL, L.DA

RUA FILIPE FOLQUE, 7, 1.º — LISBOA

Telefone (P P C - 2 linhas) — 57193 • Telegramas: ERICSSON

AZEVEDO & PESSI, L.DA

RUA NOVA DO ALMADA, 46

LISBOA — PORTUGAL

TELEGRAMAS: PESSIL-LISBOA — TELEFONES: 29879-24495-20354

AZEVEDO & PESSI, L.DA

OFERECEM **EQUIPAMENTO PARA INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS E APARELHAGEM ELÉCTRICA DAS SUAS REPRESENTADAS**

Emile Haefely & Cie., S. A. — Basileia	**Transformadores, Condensadores**
Sprecher & Schuh, S. A. — Aarau	**Aparelhagem eléctrica**
Baume & Marpent, S. A. — Haine-St-Pierre	**Material rolante, Gasómetros**
Heinrich Flottmann, G. m. b. H. — Herne	**Martelos pneumáticos, Compressores**
Salzgitter Maschinen A.-G. — Salzgitter	**Pás mecânicas, Rastilhos perfuradores**
Badische Maschinenfabrik A.-G. — Karlsruhe	**Equipamento para fundições**
Berkefeld Filter Ges. m. b. H. — Celle	**Filtros, Instalações de correcção**
Luke & Spencer, Ltd. — Altrincham	**Amoladoras, Mós**
Eschwerke K.-G. — Duisburgo	**Britadeiras, Trituradoras**
Knapsack-Griesheim A.-G. — Frankfort	**Equipamento de soldadura**
F. Kueppersbusch & Soehne A.-G. — Gelsenkirchen	**Cozinhas, Fogões**
Mench S. A. — Bruxelas	**Equipamento para lavandarias**
Bergedorfer Eisenwerk A.-G. — Hamburgo	**Instalações frigoríficas, Centrais leiteiras**
Seitzwerke A.-G. — Kreuznach	**Máquinas para engarrafamento**
Intexico — Hamburgo	**Metais, Máquinas-ferramentas**
Anton Kaeser — Hamburgo	**Instalações de condicionamento de ar**

FÁBRICA DE PORCELANA DA VISTA ALEGRE, L.DA

Fundada em 1824

POR

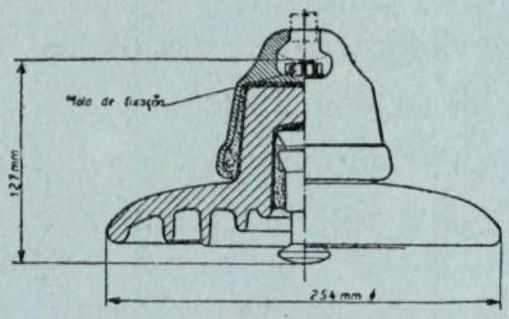
José Ferreira Pinto Basto

ISOLADORES DE CADEIA

Para suspensão

Tipo ACS 25

Este isolador é igual ao tipo I. B. S. 99 da firma inglesa Taylor Tunnicliff & Co., Ltd., por acordo com a qual o fabricamos



Peso aproximado: 4,3 kg cada elemento

Materiais

Porcelana vidrada em castanho.
Campânulas de ferro fundido maleável, galvanizadas por imersão a quente.
Hastes de aço macio galvanizadas por imersão a quente.
Molas de fixação de bronze fosforoso.

Lisboa — Sede: Largo da Biblioteca, 17
Depósitos: Lisboa — Largo do Chiado, 18

Fábrica em Ílhavo — Aveiro
Rua Cândido Reis, 118 — Porto

EIS 4 PONTOS QUE TORNAM A

SCHIELD BANTAM DE 3/8

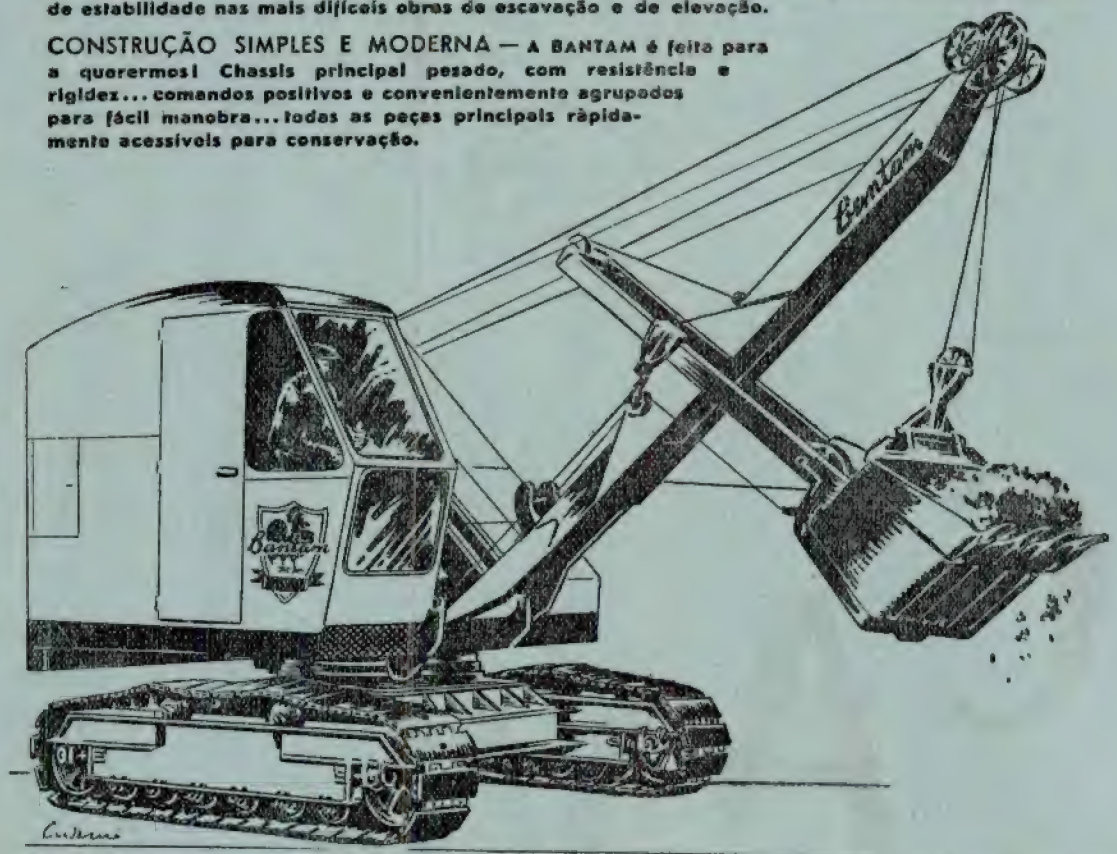
NA MÁQUINA MAIS DISPUTADA

MARCHA INDEPENDENTE — Uma característica "standard" da SCHIELD BANTAM que permite ao operador mover o equipamento frontal durante a marcha... ideal para escavação... enchimento de valas... manuseamento de materiais.

BARATA... GRANDE ESCALA DE TRABALHOS — A escavadora de mais baixo custo na indústria que vos dá ao mesmo tempo uma execução que não foi ainda atingida no seu campo por qualquer outra máquina. Nove acessórios de fácil montagem equipam a BANTAM para executar centenas de obras com maior rapidez e por menor custo.

BASE DE LAGARTAS DEVIDAMENTE EQUILIBRADA — Comprida e larga - quase quadrada - tem ainda um baixo centro de gravidade e uma folga sobre o chão adequada, permitindo-lhe o máximo de estabilidade nas mais difíceis obras de escavação e de elevação.

CONSTRUÇÃO SIMPLES E MODERNA — A BANTAM é feita para a querermos! Chassis principal pesado, com resistência e rigidez... comandos positivos e convenientemente agrupados para fácil manobra... todas as peças principais ràpidamente acessíveis para conservação.



GUINDASTE • VALADORA • PÁ DE ARRASTO • COLHER DE MANDÍBULAS
ESCAVADORA • MAGNETO • BATE ESTACAS • ENCHEDOR DE VALAS

DISTRIBUIDORES EXCLUSIVOS PARA PORTUGAL E ULTRAMAR

BLACKWOOD HODGE

Av. Almirante Reis, 247-C — Telef. 75984

LUANDA — LISBOA — L. MARQUES

COMPANHIAS ASSOCIADAS FILIAIS OFICINAS E AGÊNCIAS EM TODO O MUNDO

FUNDIÇÃO E CONSTRUÇÃO MECÂNICAS

S. A. R. L.

OEIRAS

Uma grande organização na «Indústria Metalúrgica e Metalomecânica nacional»

Com **Fábrica** onde se produz:

Fundição de ferro, Ferros Ligas e Metais, Esmaltes — Esmaltagem

OFICINAS DE SERRALHARIA E FORJAS

Alguns artigos de série:

Banheiras de ferro fundido esmaltado — Todos os artigos sanitários para casa de banho e cozinha — Caldeiras e radiadores para aquecimento central — Salamandras — Fogões e fogareiros a gás — Fogões a lenha e carvão — Escadas e escadotes — Tábuas de engomar — Material para construção civil (aros para claraboias, sifões de pátio, ventiladores, portinholas, olhos de boi, autoclismos, etc.) — Bancos de jardim — Candeeiros para iluminação pública, etc.

PROJECTOS, ORÇAMENTOS E EXECUÇÃO DE INSTALAÇÕES E AQUECIMENTO CENTRAL

Vendas directas ao comércio da especialidade

Telef. Oeiras { P. P. C. 324 — 4 linhas / Administ. 156

Teleg. Fundição — OEIRAS

Correio: Apartado 711
LISBOA — CENTRAL

SECÇÃO DE AQUECIMENTO

Av. António Augusto de Aguiar, 7-A

Telefone 4 1110

CAVAN

SOCIEDADE PORTUGUESA

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS

MOSAICOS E AZULEJOS

COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

MANILHAS PARA ESGOTOS

RUA D. ESTEFÂNIA, 42

TELEF. 47812-50129

LISBOA

LEACOCK (LISBOA), L.DA

AV. 24 DE JULHO, 16
LISBOA

R. JOSÉ FALCÃO, 185
PORTO

SECÇÃO DE MÁQUINAS E ELECTRICIDADE

REPRESENTANTES DE:

THE RAWLPLUG COMPANY, LTD.
Material de fixação para construção civil e mecânica.

HOOVER, LTD.
Motores eléctricos desde 1/8 até 3/4 H. P., Monofásicos e Trifásicos.

VERITYS, LTD.
Motores eléctricos desde 1 até 125 H. P

J. A. CRABTREE & CO. LTD.
Material para instalações de luz: interruptores, fichas, tomadas, etc.
Material para instalações de força: arrancadores, disjuntores, caixas, etc.

TRANSFORMERS & WELDERS, LTD.
Transformadores de todos os tipos até à potência de 3000 K. V. A. e até à tensão de 33000 Volts.

BARTON CONDUITS, LTD.
Tubo de aço para instalações eléctricas.

EDWARD MAC BEAN & CO. LTD.
Tubo, fita e pano de tela envernizada.

MEASURING INSTRUMENTS (PULLIN), LTD.
Amperímetros, Voltímetros, Frequencímetros, Wattímetros de todos os tipos e escalas.

F. PERKINS, LTD.
Motores Diesel marítimos.

THE AUTOMATIC COIL WINDER AND ELECTRICAL EQUIPMENT CO, LTD.
Osciladores, capacímetros, texts universais, texts electrónicos, analisadores de válvulas, luxímetros, expositores para fotografias.
Máquinas para bobinar e enfitar.

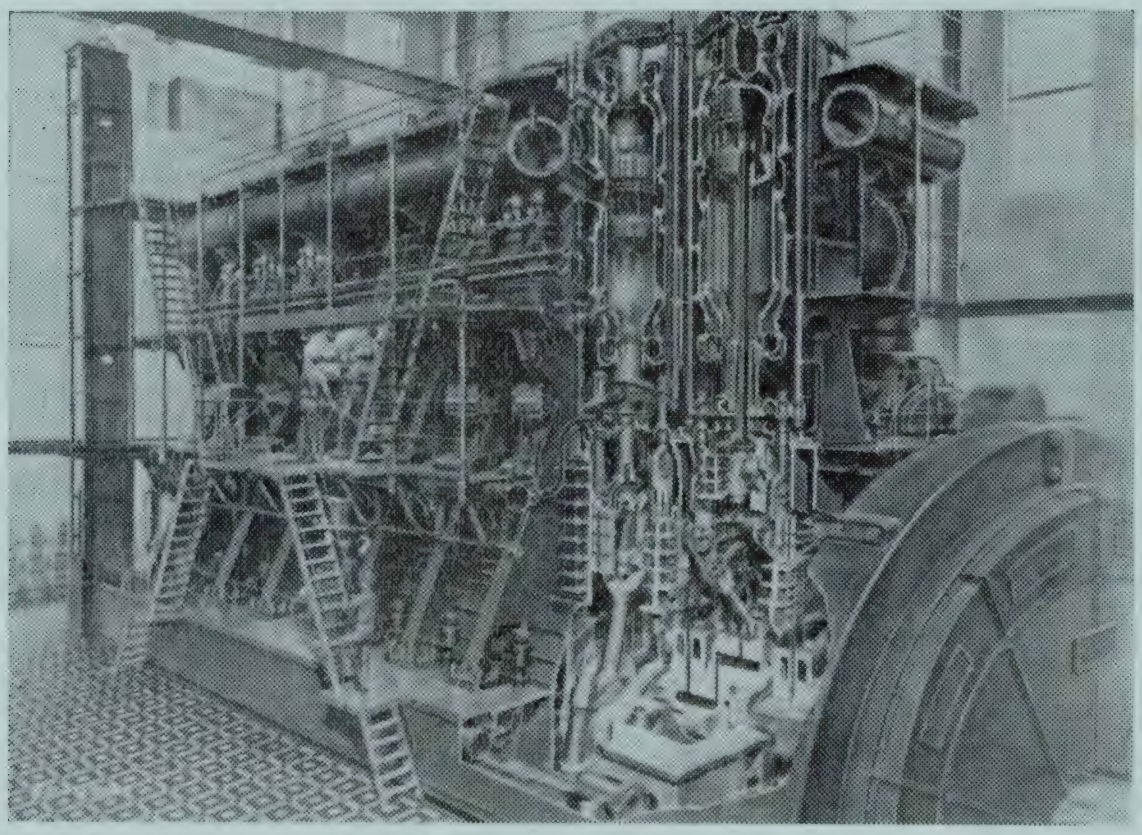
GEORGE KENT
Contadores de água, de vapor e de óleo.
Tubos Venturi
Determinadores e controladores do pH, do CO_2 e pirómetros pelo processo potenciométrico.
Combustiómetros, manómetros, registadores de distâncias, medidores-registadores de caudais, medidores de orifícios em condutas para gases.

THORN ELECTRICAL INDUSTRIES, LTD.
Luz fluorescente e rádios.

ELECTRIC PANELS, LTD.
Aquecimento eléctrico.

O MAIOR DIESEL DO MUNDO

ESTÁ AO CUIDADO DO MELHOR SERVIÇO DE LUBRIFICAÇÃO DO MUNDO



Para chegar à parte superior deste gigante, existe um elevador ou tem V. Ex.ª que subir 3 lanços de escada. Trata-se do maior Diesel do mundo, construido por Burmeister & Wain.

Altura 12 metros, e 24 metros de comprido, incluindo o gerador Tem 8 cilindros com cerca de 1 metro de diametro e 1,77 de curso do embolo... Potência 22.500 cavalos, produzindo 15.000 Kw.

Para proteger estes titanicos cilindros e embolos, escolheu-se um dos famosos óleos Gargoyle D. T. E. para motores Diesel.

Este mesmo tipo de Lubrificação Racional encontra-se à sua disposição, quer para motores de fábricas e centrais, quer para qualquer outro maquinismo, a fim de garantir o máximo rendimento com a menor despesa. Basta comunicar com a Secção Técnica da Socony Vacuum.

GARGOYLE

SOCONY-VACUUM PORTUGUESA

2512

TÉCNICA

DIRECTOR — JOSÉ M. CRUZ MORAIS ADMINISTRADOR — FERNANDO MARQUES DE OLIVEIRA
SECRETÁRIO: VIRGÍLIO DOS REIS CARDOSO IGREJA
CORPO REDACTORIAL — ANTÓNIO SEVERINO PINTO, CARLOS M. NOGUEIRA MARTINS, JOÃO PEDRO ANTUNES GOMES, JOSÉ M. FREITAS CRUZ E LUIZ F. LUCENA FERREIRA

Ano XXIX - N.º 238 Janeiro de 1954

C. D. 666.942

ALGUNS ASPECTOS DA TÉCNICA DO FABRICO DO CIMENTO PORTLAND

PELO ENG.º CIVIL (E.P.U.L.) JOSÉ OSÓRIO DA ROCHA E MELO

Conferência proferida no I. S. T., em 10 de Dezembro de 1953, a convite da Direcção da Revista «Técnica»

Sob a designação de «aglomerantes ou ligantes hidráulicos» existe um grupo de substâncias, de entre as quais, se destacam os cimentos, destinados, como aliás todos os ligantes, à preparação de argamassas; estas por sua vez à ligação umas às outras das pedras naturais ou artificiais com as quais executamos as nossas construções.

Essas argamassas são destinadas a obras aéreas ou hidráulicas. Os ligantes aéreos, cujos principais representantes são o barro, a cal e o gesso não são aplicáveis debaixo de água, por o seu endurecimento ser consequência de secagem, absorpção de anidrido carbónico ou de acção da água; os segundos têm a propriedade de endurecer debaixo de água. Na lista dos aglomerantes hidráulicos aparece-nos o Cimento Portland em posição de destaque, devido à circunstância de ser o último elo na cadeia do desenvolvimento da investigação dos aglomerantes, condensando em si um conjunto de propriedades úteis, que nenhum outro aglomerante possui.

Admite-se que o ano de 1824, foi o do nascimento do cimento Portland, em que o inglês Joseph Aspdin pediu e obteve patente de um aglomerante que endurecia mesmo debaixo de água, que baptisou com o nome de Portland, por, na sua cor se assemelhar à cor da pedra natural da ilha de Portland, bem conhecida entre os construtores ingleses daquele tempo e em tão boa hora que, passados 130 anos, ainda se lhe conserva o nome.

O cimento Portland forma-se pela cozedura de substâncias calcáreas e argilosas, em mistura íntima e em proporções bem definidas; essa cozedura é levada até à «vitrificação» ou «escorificação», isto é até ao amolecimento pastoso da massa, resultando uma estrutura densa de aparência pétrea, no género do basalto (rocha ígnea) a que se chama «clinquer».

Se a rocha calcáreo-argilosa, possuir composição tal, que não necessite correcção, da sua cozedura resultará um Cimento Natural. Jazigos nessas condições são extremamente raros.

A cozedura dos aglomerantes, conforme a temperatura e o estado físico-químico final, faz-se sob 3 formas:

1.º — *Ustulação,* tostação ou fritagem (do francês-fritter), tem lugar quando pelo calor a estrutura do material se compacta, mas sem aparecimento da fase líquida.

2.º — *Vitrificação,* escorificação ou sinterização (do alemão sintern), quando, além da compactação do material há já aparecimento da fase líquida, que se traduz num maior ou menor amolecimento, sem desaparecimento da fase sólida, que se mantém em maioria.

3.º — *Fusão* ou liquefação, quando pela elevação de temperatura há desaparecimento total da fase sólida em favor da fase líquida.

Os aglomerantes hidráulicos em que a cozedura consiste numa ustulação, são as Cales Hidráulicas e as chamadas Cales Romanas.

A Cal Hidráulica é obtida a partir de margas calcáreas, que são cozidas e submetidas a extinção. Neste caso a parte calcárea está em excesso, uma parte da cal fica no estado livre; pela acção da água, transforma-se em hidrato de cálcio, cal apagada, pulverizando-se. A parte que se não pulveriza, o rolão (grappier dos franceses) é passado aos moinhos e depois adicionado à cal.

A Cal Romana (também chamada Cimento Romano) é obtida da mesma forma, apenas em vez de marga calcárea, parte-se de uma marga mais argilosa.

Ao contrário da cal hidráulica, depois da cozedura não aparece cal no estado livre, porque a parte argilosa está em excesso, portanto todo o produto cozido é rolão, que é necessário reduzir a pó por moagem.

A classificação dos calcáreos argilosos é a seguinte:

Calcáreo rico	96 a	100	% de	$Ca\ Co_3$
Calcáreo margoso	90 »	96	»	»
Marga calcárea	75 »	90	»	»
Marga	40 »	75	»	»
Marga argilosa	10 »	40	»	»
Argila margosa	4 »	10	»	»
Argila	0 »	4	»	»

No cimento Portland a relação $\frac{\text{cal}}{\text{argila}}$ (o índice de hidraulicidade) está compreendida entre 1,8 e 2,2. É a zona do cimento.

Na cal romana (cimento romano) esse índice é inferior a 1,8, portanto forma à esquerda do cimento Portland; na cal hidráulica o índice é superior a 2,2, forma então à direita do cimento.

Os cimentos Portland, os cimentos naturais, os cimentos aluminosos, que adiante veremos, as cales hidráulicas e romanas, têm todos a propriedade de reagir com a água e darem produtos que endurecem debaixo de água. Têm pois propriedades hidráulicas *activas.* Outro grupo de substâncias existe, que não tem propriedades activas, mas que, excitadas, em presença de certos compostos (catalizadores) tomam parte no endurecimento.

Podemos dizer que tem *propriedades hidráulicas latentes.* Estão nessas condições as escórias de alto forno (siderúrgico) e as pozolanas naturais ou artificiais. No nosso País, onde não há por ora indústria siderúrgica, mas onde se prevê a sua possibilidade próxima, não deixaremos de considerar também a escória. Para que essa escória adquira essa propriedade, é necessário ter natureza básica e ser arrefecida bruscamente com ar ou com água, granulando-se.

Se a escória arrefecer lentamente, o pó resultante da sua moagem não tem propriedades hidráulicas latentes.

Moendo conjuntamente escória granulada com cal, obtém-se o chamado «Cimento de Escórias».

Se em vez de cal moermos a escória com clinquer de cimento Portland, resultarão os chamados «Cimentos Metalúrgicos». Estes subdividem-se em Cimentos Portland Ferro

e Cimento de Alto Forno, conforme a percentagem de clinquer for ou não predominante em relação à escória.

Se a escória for moída com gesso, resulta um tipo de cimento conhecido no mercado por «Cimento Super-Sulfatado».

Outra classe de substâncias com propriedades hidráulicas latentes são as pozolanas, tanto as naturais como as artificiais. Não tem por si propriedades aglutinantes, mas possuem componentes activos, sílica e alumina que à temperatura ordinária reagem com a cal em presença da água, formando combinações insolúveis e estáveis, capazes de endurecer.

Juntando pozolana à cal, obtém-se «Cal Pozolânica», que os romanos já conheciam e com a qual faziam os seus trabalhos fluviais e marítimos.

A pozolana era cinza vulcânica da região do Vesúvio. Se a juntarmos ao cimento, obtemos os «Cimentos Pozolânicos». O quadro n.º 1 resume a classificação.

QUADRO 1

Classificação dos aglomerantes hidráulicos

Aglomerantes de base siliciosa													Aglomerantes de base aluminosa
Hidráulicos activos					De hidraulicidade latente				Com aditivos hidraulizantes				
Não vitrificados		Vitrificados			Alcalinos			Sulfatados	Pozolana		Inertes		
			Cimentos Portland		Cimentos Metalúrgicos				Clinquer	Cal			
Cales hidráulicas	Cal romana (cimento romano)	Cimento natural	Cimento Portland Normal	Cimento Ferrari	Cimento Portland ferro	Cimento de alto forno	Cimento de escórias	Cimento super-sulfatado	Cimento Pozolânico	Cal Pozolânica	Cimentos mistos		Cimento fundido

Composição química do Cimento

Os componentes da argila são a sílica (SiO^2) e a alumina (Al^2O^3) (e ferro Fe^2O^3), que depois da cozedura e consequente reacção com a cal dão a série de aglomerantes, cuja situação no diagrama ternário Cal-Sílica-Alumina, a fig. 2 representa.

Não vamos entrar no complicado estudo deste sistema ternário (e mesmo quaternário), que durante tantos anos ocupou uma série de cientistas, tais como Rankin, Wright, Bogue e Brownmiller, mas limitamo-nos a apresentar o resultado mais importante a que chegaram.

A análise elementar dum cimento Portland é expressa numa série de óxidos

$$SiO^2 — Al^2O^3 — Fe^2O^3 — CaO — MgO — SO^3$$

Ao problema da constituição do cimento, ou seja da maneira como estão associados estes óxidos entre si depois da cozedura, foi encontrada uma solução há vinte anos escassos. Admitindo que uma mistura crua de cal-sílica, alumina e ferro nas proporções óptimas para o fabrico de cimento Portland seja levada à temperatura de fusão pastosa e que essa fusão esteja em equilíbrio, os componentes resultantes são os silicatos bi e tricálcico, aluminato tricálcico e ferro-aluminato tetracálcico, que o microscópio confirma.

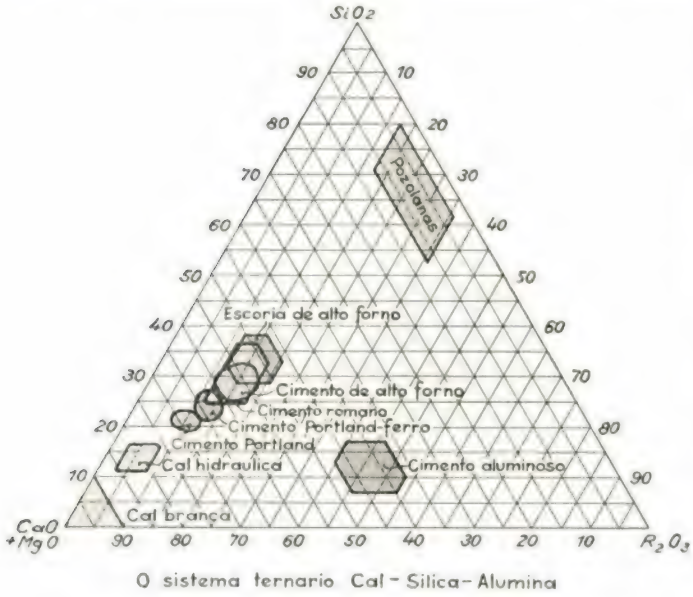


Fig. 2 — O sistema ternário Cal — Sílica — Alumina

É na realidade difícil obter condições óptimas para esse equilíbrio, nessa fusão sólida, da qual, números redondos, $^1/_3$ da massa, apenas, é que funde.

Seja como for, esta hipótese permitiu dar um grande passo em frente na técnica do fabrico.

O quadro seguinte n.º 3 mostra-nos as propriedades que cada um dos constituintes confere ao cimento.

É possível, por alteração das relações cal-sílica e alumina-ferro fazer variar as propriedades do cimento. Por adjunção de sílica sob forma de areia e de ferro sob forma de cinza de pirite (residuo das fábricas de ácido sulfúrico), vão aumentar as percentagens de C_2S e C_4AF em detrimento dos outros dois, resultando um cimento com um calor de hidratação mais baixo, muito apreciado nas obras de grande massa, como sejam as barragens.

QUADRO 3

Constituintes do cimento

	Em abreviatura	Propriedades
Silicato tricálcico $3CaO, SiO_2$	C_3S	Endurecimento rápido — Altas resistências iniciais — Calor de hidratação elevado
Silicato bicálcico $2CaO, SiO_2$	C_2S	Endurecimento lento mas prolongado Calor de hidratação baixo
Aluminato tricálcico $3CaO, Al_2O_3$	C_3A	Endurecimento inicial rápido, calor de hidratação elevado, aumenta o retraimento, atacado pelos sulfatos, em percentagem elevada, presa rápida
Ferro — aluminato tetra — cálcico — (Brownmillerite) $4CaO, Fe_2O_3, Al_2O_3$	C_4AF	Endurecimento lento, mais resistente aos sulfatos
Cal livre — CaO		Em pequena dose inofensivo; em dose elevada expansivo
Magnésia — MgO		Idem, idem

A diminuição de C_3 A, por processo semelhante permite obter cimento resistindo melhor à acção dos sulfatos e portanto em melhores condições para resistir ao ataque do sulfato de magnésio existente na água do mar. Este sulfato em presença da alumina do cimento, forma um sulfo-aluminato de magnésio que destrói a coesão das argamassas, visto formar-se com aumento de volume; é conhecido pelo nome de Sal de Candlot, ou o baclio de cimento.

Para passar da análise elementar, expressa em óxidos, para a constituição «potencial», assim chamada do cimento, pode usar-se o método de Bogue, fig. 4, servindo-se de 3 gráficos.

O 1.º permite-nos determinar a percentagem de sulfato de cálcio, o 2.º os aluminatos e o 3.º os silicatos.

Um exemplo ilustra o «modus faciendi»:

Seja o cimento, cuja composição em óxidos é dada.

Utilizando o 1.º gráfico e marcando nele a °/₀ de SO^3 que é um 1,6, encontramos 2,7 °/₀ para Ca SO_4 à esquerda e 1,1 °/₀, à direita, para a cal necessária à formação do sulfato.

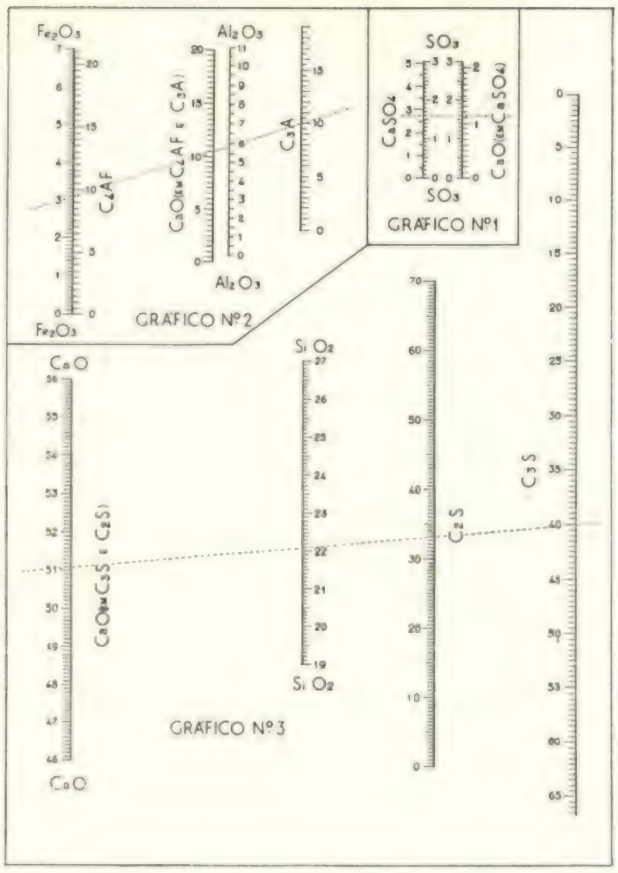


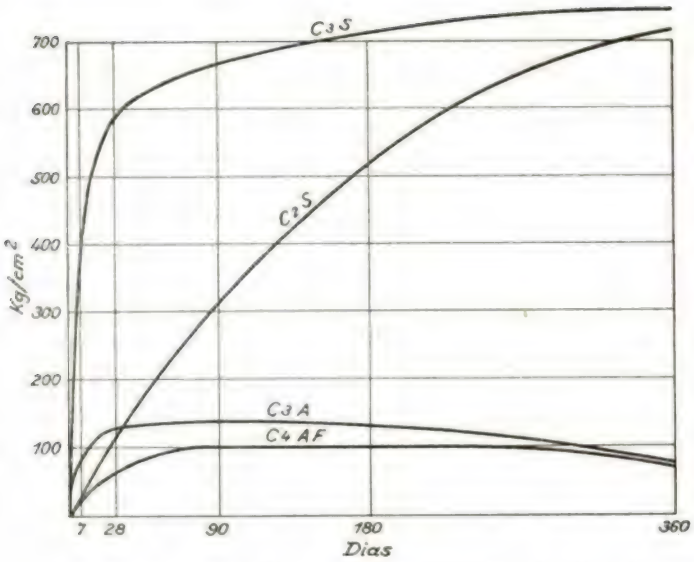
Fig. 4

		°/₀ de óxidos	°/₀ de Ca O	°/₀ de compostos	
Si O_2	22,1 °/₀				
Al_2 O_3	6,0 »	SO_3 = 1,6	1,1	SO_4 Ca	= 2,7
Fe_2 O_3	3,1 »	Fe_2 O_3 = 3,1	10,8	C_4 AF	= 9,3
Ca O	64,0 »	Al_2 O_3 = 6,0		C_3 A	= 10,2
Mg O	1,5 »	Ca O livre	1,0	Ca O livre	= 1,0
SO_3	1,6 »	Ca O = 64,0 —	12,9 = 51,1	C_2 S	= 33,0
Ca O livre	1,0 »	Si O_2 = 22,1		C_3 S	= 40,0
Perda ao rubro	0,7 »				

No 2.º gráfico marquem-se as percentagens de Al^2O^3 e Fe^2O_3, respectivamente 6,0 e 3,1 °/₀; unam-se por uma recta os 2 pontos e prolonguem-se. Encontramos 9,3 °/₀ de C_4AF e 10,2 °/₀ de C_3A, que necessitaram em conjunto 10,8 °/₀ de CaO. No 3.º gráfico marque-se SiO^2 da análise e veja-se qual é a cal ainda restante (51,1 °/₀). Marcando esse ponto e unindo os dois por recta que é prolongada para a direita, encontramos para C_2 S e C_3 S respectivamente 33,0 e 40,0 °/₀.

O gráfico n.º 5 mostra as curvas de crescimento das resistências dos constituintes. Verifica-se que são os silicatos os elementos activos, enquanto que os aluminatos, fornecendo os fundentes, facilitam a cozedura, apenas.

Na América, para os diferentes tipos de cimento, as exigências de ordem química são as que constam do quadro n.º 6.



Curvas de resistência dos constituintes do cimento

Fig. 5

Matérias primas — Os calcáreos de todas as formações geológicas e as suas variedades margosas são as matérias-primas quase universais, empregadas para a preparação do cimento, desde que não contenham compostos prejudiciais e a sua textura permita uma redução a pó impalpável e boa homogeneização química.

Para as argilas exige-se o mesmo; juntas aos calcáreos vão-lhes introduzir os elementos hidraulizantes, sílica, alumina, ferro.

A areia e os minérios de ferro utilizam-se para alterar as percentagens de sílica e ferro. O spath-fluor é em certas condições utilizado como fundente (cimento branco).

O químico alemão Michaelis, como consequência dos estudos a que se dedicou, paralelamente a Vicat e Le Chatelier em França, estabeleceu a bem conhecida relação $\frac{CaO}{SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2}$ a que chamou, como vimos, índice de hidraulicidade, entre os valores 1,8 e 2,2, limites dentro dos quais ainda hoje se situam os cimentos Portland. Outras relações importantes para o fabrico e de uso corrente a relação $\frac{\text{Sílica}}{\text{sesquióxidos}}$ a que se chama «módulo silícico» e ainda a relação entre os sesquióxidos, $\frac{Al^2O^3}{Fe^2O^3}$, o «módulo aluminoso».

QUADRO 6

N.º A. S. T. M.	Tipo	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
		Composição média %			
1	Cimento normal	43	31	12	8
2	Cimento modificado	43	30	6	13
3	Endurecimento rápido	56	15	12	8
4	Baixo calor de hidratação	21	51	6	14
5	Resistente aos sulfatos	43	40	5	7

Classificação Americana dos Cimentos
A. S. T. M. — American Society for Testing Materials

Nos cimentos correntes, esse valor anda à volta de 2.

Se a relação for a dos respectivos pesos moleculares $\frac{Al^2O^3}{Fe^2O^3} = 0{,}64$ estamos em presença do cimento Ferrari, que não possui C_3A e só tem C_4AF. Conhecida a composição de cada uma das matérias-primas, fixa-se o índice de hidraulicidade que nos dá a relação cal/argila e dentro da argila estabelece-se o módulo silicioso (que varia geralmente entre 1,7 e 2,5) e o aluminoso que como se acabou de dizer anda à roda de 2.

Tecnologia da fabricação

Os processos usados para a fabricação do cimento Portland são a via seca e a via húmida.

De uma maneira geral é a natureza das matérias-primas que decide por qual das duas se deve optar. Em Portugal das cinco fábricas existentes, três adoptaram a via seca e duas a via húmida.

Usualmente as pedras extraídas nas pedreiras são trituradas, secas (caso da via seca) doseadas com as restantes matérias-primas, reduzidas a pó ou pasta fina, que é homogenizada, a sua composição química acertada, conduzida ao forno onde é cozida até à vitrificação. O produto obtido, o clinquer, depois de arrefecido é moído com uma certa percentagem de gesso cru, donde resulta o produto final, o cimento Portland. A fig. 7 ilustra a descrição.

1 — *Extracção da matéria-prima*

De uma maneira geral a matéria-prima principal é um calcáreo mais ou menos argiloso, que se explora a flanco de encosta ou em profundidade. As fábricas maiores (Secil, Tejo, Liz) com a sua produção diária de 700 a 1.000 t de cimento, necessitam 1.100 a 1.600 t de pedra cada dia, quantidade esta que exige poderosos meios mecânicos de extracção.

A tendência moderna é de abater grandes massas de pedra, quando não haja razões especiais para proceder de outro modo. Casos há em que a exploração com meios rudimentares, não encarece a pedra arrancada.

Para isso, fazem-se uma série de furos, à perfuradora mecânica, a distância calculada do bordo da pedreira e a profundidade em relação com a altura da mesma — Carregam-se os furos e provoca-se a explosão.

Num dos primeiros ensaios feitos na pedreira da Fábrica Tejo em Alhandra, propozemo-nos abater cerca de 20.000 t de pedra de um só tiro com cerca de 1.600 kg de explosivo.

Assim se fez na verdade, mas o abalo ressentiu-se violentamente num círculo de raio de 1,5 km, havendo casas que fenderam e na própria povoação da Alhandra, possìvelmente devido às condições geológicas do terreno, (massa montanhosa de calcário que encosta à zona lodosa do Tejo, sobre a qual está edificada a povoação), produziu o efeito de tremor de terra e houve pânico.

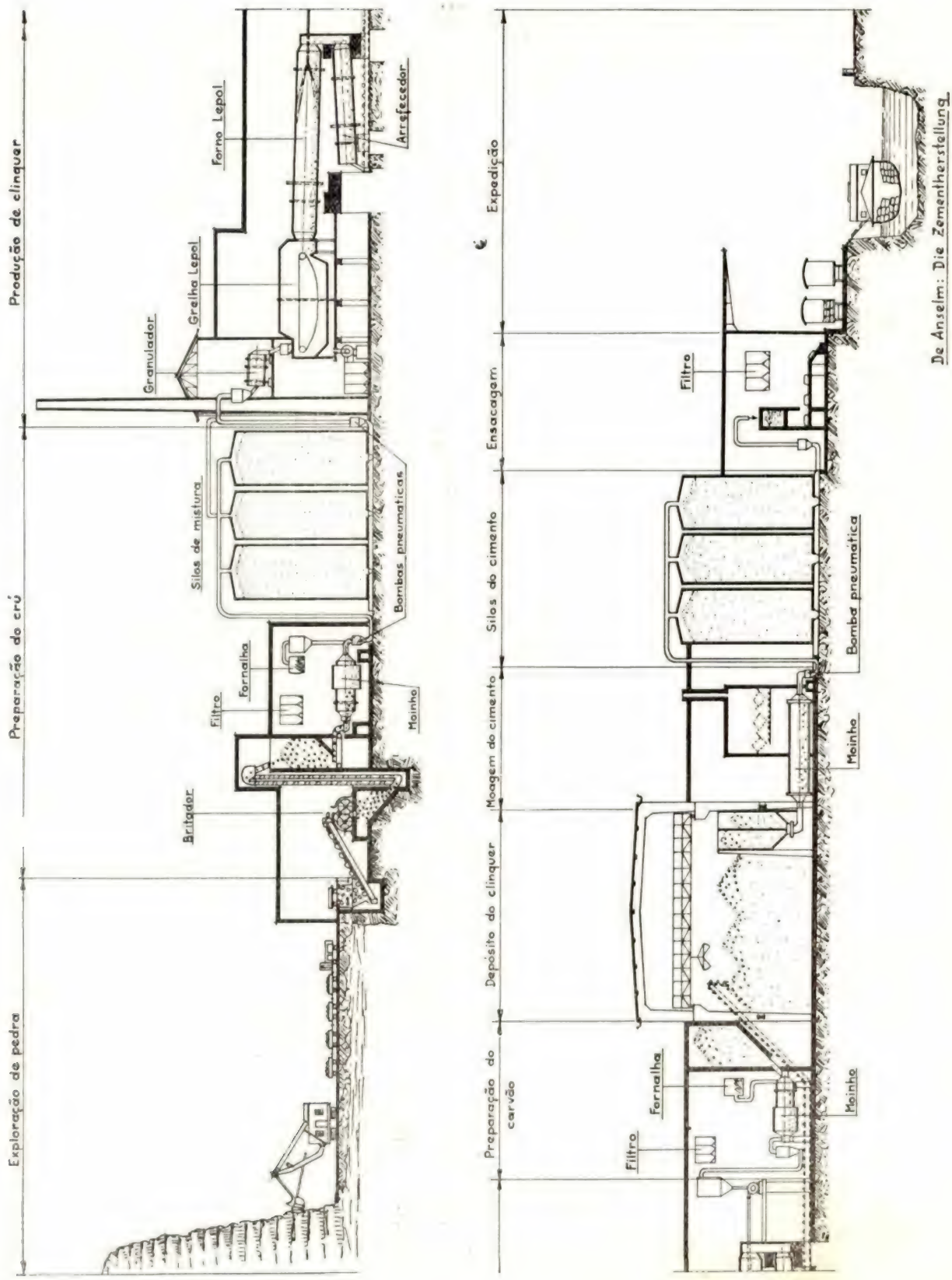
Ora este efeito foi provocado pela simultaneidade da explosão, cerca de 40 cargas, inflamados com cordão detonante. Provàvelmente devido a inconvenientes semelhantes, a fábrica de explosivos Du Pont de Nemours na América, criou um aparelho a que chamou «Blasting Timer» para inflamação eléctrica de cargas explosivas, não simultânea mas sucessivamente. Efectivamente, por meio de um tambor com contactos eléctricos sucessivos, comandado por um pequeno motor eléctrico, consegue-se fazer explodir as cargas com diferenças de $/_5$ a $^1/_{20}$ de segundo.

O efeito acústico é o de um canhão-metralhadora gigante e os efeitos de destruição são notáveis, pois não só a pedra fractura muito melhor, ficando em pedaços bastante mais pequenos, como também não produz tremores de terra.

Uma vez a pedra abatida, com martelos-revólver a ar comprimido faz-se a petardagem secundária dos blocos maiores por forma a que a colher da escavadora os possa carregar para camions-basculantes que os transportam aos britadores.

Estes podem ser de vários tipos, conforme a natureza da matéria-prima: Britadores de maxilas cónicos, de martelos, de rolos e galgas.

As figs. 8 e 9 mostram o 2.º e 3.º tipos que são menos correntes.



De Anselm: Die Zementherstellung

LECTRODRYER «BIRLEC»

EQUIPAMENTO PARA ABSORPÇÃO E CONTROLE DA HUMIDADE

O excesso de humidade pode motivar graves inconvenientes e sempre que esta seja a causa do seu problema, o equipamento «LECTRODRYER-BIRLEC» poderá resolvê-la económica e eficientemente

BIRLEC BIRLEC **LIMITED**

FABRICANTES DE

FORNOS ELÉCTRICOS PARA TRATAMENTOS TÉRMICOS

AGENTES:

AHLERS, LINDLEY, L.DA

Rua Ferragial de Baixo, 33-2.º

LISBOA

Telefone 21321/4

tintas para artistas

Mantendo um serviço destinado aos artistas de todo o Mundo, Reeves, os principais fabricantes britânicos de tintas, estudaram as necessidades dos pintores durante quase 200 anos, tendo alcançado uma reputação com as suas tintas e equipamentos de primeira qualidade que não tem rival. Todos os materiais empregados na sua manufactura são cuidadosamente ensaiados e seleccionados de modo a produzirem tintas de completa confiança e brilho extraordinário, tão úteis para proporcionarem aquela segurança indispensável para trabalhos com êxito.

Quaisquer que sejam as suas necessidades, REEVES dará perfeição ao seu trabalho com :

Tintas de óleo "Goya". Aguarelas. Lápis para pastel. Pincéis. Guaches. Puneses e todos os materiais indispensáveis para os artistas.

REEVES & SONS, LTD.
DALSTON, LONDON
ENGLAND

Reeves

EST. 1766

TRADE MARK

Representante em Portugal :

A. LOPES DA SILVA — R. dos Fanqueiros, 15-2.º — LISBOA

O NOME REEVES É UMA GARANTIA DE CONFIANÇA

No Continente como no Ultramar defendem e seguram importantes capitais aplicados nas grandes obras hidro-eléctricas nacionais :

BELVER
CABRIL
CASTELO DO BODE
MABUBAS
SERRA DA ESTRELA
PRACANA
SALAMONDE
VENDA NOVA

PRODUTOS INERTOL

A Construção Civil confia-lhes, também, a protecção de seus :

ALICERCES
EMPENAS
TERRAÇOS
CASAS DE BANHO
PISCINAS
DEPÓSITOS
TUBAGENS
ETC., ETC.

Pelos telefones :

LISBOA 56999 • PORTO 27648

presta-se assistência imediata a qualquer consulta ou informação

SONDAGENS RÓDIO, L.DA

LISBOA

RUA S. MAMEDE AO CALDAS, 22, 3.º

Telefones: 2 8685 - 2 6865 ✦ Telegramas : **SETANSOL**

RÓDIO

SONDAGENS GEOLÓGICAS
ESTUDOS GEOTÉCNICOS
ESTACAS GUNITA
CAPTAÇÃO DE ÁGUAS
CONGELAÇÃO DO TERRENO
IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS HIDRÁULICAS
CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÕES
ABAIXAMENTO DO LENÇOL DE ÁGUA

—//—

Sócio gerente: **Walter Weyermann**-Eng. civil

Processos de fabrico

Tratando-se de *fábrica por «via seca»*, há que prever a secagem da matéria-prima uma vez britada.

Se a humidade é superior a 7 a 8 % é de aconselhar utilizar tambores secadores rotativos independentes.

Se a humidade na matéria-prima é inferior àquela percentagem, pode utilizar-se a secagem-moagem numa só operação, dentro do próprio moinho. O tambor secador

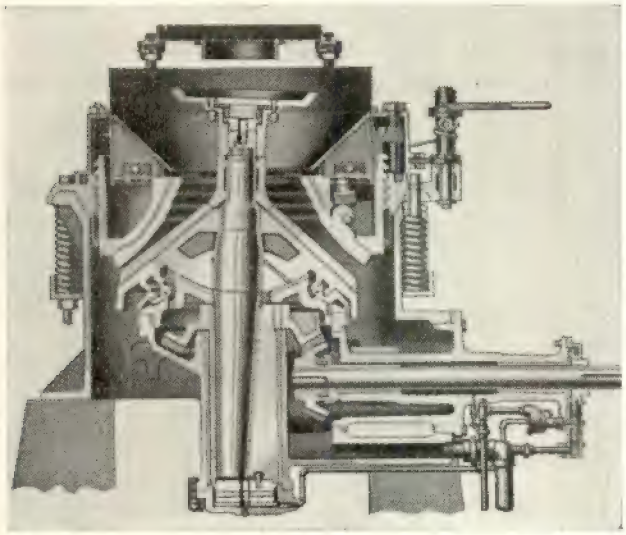


Fig. 8

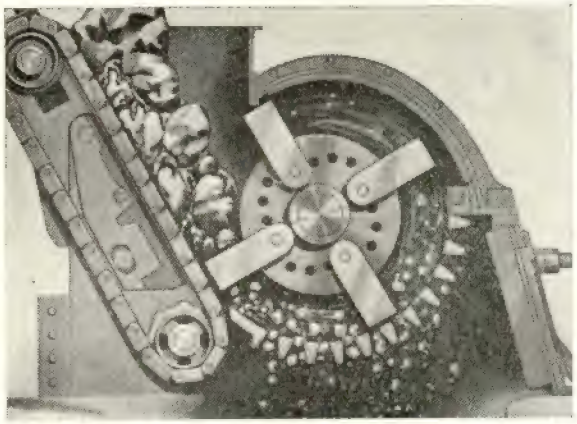


Fig. 9 — Britador de martelos

rotativo, cilindro de chapa com cintas de rolamento e compartimentado no sentido longitudinal, em geral com 15 a 25 metros de comprido por 1,40 m a 3 m de diâmetro, pode ser percorrido pelos gases da fornalha no mesmo sentido da matéria-prima ou em sentido contrário.

Utiliza-se o mesmo sentido no caso de matérias-primas plásticas e húmidas, como sejam as argilas gordas, com tendência a colar-se às paredes: nos outros casos, o princípio das correntes contrárias é mais vulgar.

Quando se trata de secar carvões para a alimentação dos fornos em pulverizado, não pode haver contacto dos gases quentes com o combustível, pelo que se fazem circular estes pelo exterior do cilindro de chapa e só depois de refrescados por esse contacto é que são admitidos no interior do tambor secador.

Tratando-se de «via húmida» e empregando argila plástica, esta vem para tanques-deslassadores com agitação, que separam da matéria-prima quaisquer outros materiais (pedras, areia, etc.) e preparam uma calda argilosa que segue para os tanques de mistura das pastas.

A moagem nas fábricas de cimento

Todas as fábricas comportam moinhos para pulverização do cru (quer seja por via húmida ou por via seca) do carvão (excepto as que utilizam nos fornos, combustíveis líquidos ou gasosos) e do produto cozido, o clinquer.

Os aparelhos de moagem dividem-se em

a) — Moinhos lentos;
b) — Moinhos rápidos.

Os primeiros que representam a grande maioria, subdividem-se em

1) Moinhos de esferas de 1 câmara;
2) Moinhos tubulares de várias câmaras.

Os moinhos de 1 câmara podem estar associados a elevadores e separadores centrífugos, podem ser ventilados (com ar frio ou quente) e separadores de ar ou no caso da via húmida conjugados com levigadores hidráulicos.

Neste caso vai a pasta líquida a decantar em grandes tanques, chamados espessadores, pelo fundo dos quais se extrai a pasta normal.

Os moinhos lentos são constituídos por um tambor curto quando possuem uma só câmara ou compridos quando são «compounds» com 2, 3 e 4 câmaras. Estes tambores, geralmente de aço sem costura, forrados interiormente de placas de blindagem de aço-manganês, suportados por cintas de rolamento ou chumaceiras de garganta, nos topos, são enchidos até determinada altura com esferas de aço especial.

Posto em rotação este tambor ou tubo, carregado de esferas. cada uma delas fica sujeita à resultante de 3 forças, a força centrífuga, a gravidade e a componente tangencial do atrito da esfera contra a parede. Fig. 10.

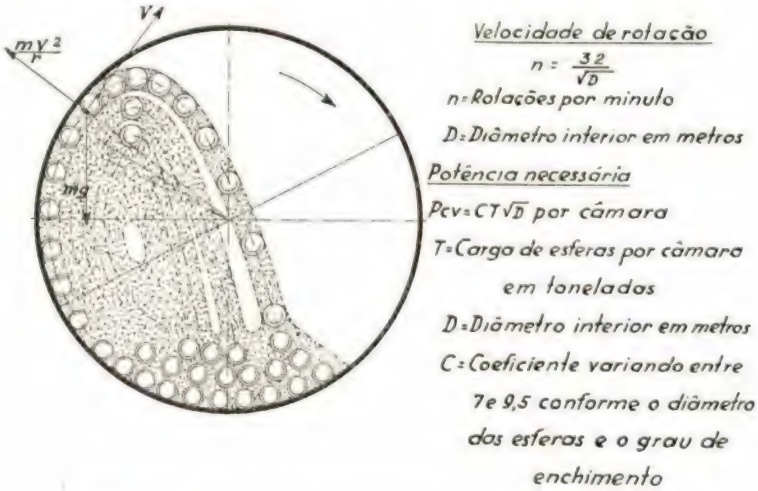


Fig. 10 — Esquema do trabalho de um moinho de esferas

Para que a eficiência seja máxima e portanto o rendimento do moinho conveniente é necessário que a força viva da esfera ao percutir a blindagem ou as outras esferas seja máxima. A figura indica esse óptimo. Compreende-se que, se a velocidade de rotação do moinho não for correcta, a esfera despegue antes ou depois do ponto conveniente, resultando uma notável baixa de rendimento. Esse óptimo é muito vizinho do que é dado pela formula empírica de Fischer:

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}}$$

A potência necessária ao funcionamento do moinho é em CV, e por câmara

$$P_{CV} = c\ T \sqrt{D}$$

C = Coeficiente dado pela tabela anexa.
T = Carga da câmara em toneladas.
D = Diâmetro interno da câmara em metros.

Valor de C para	Grau de enchimento m =		
	0,3	0,4	0,5
Esferas > 60 mm ø	9,9	8,5	7,0
Esferas < 60 mm ø e cylpebs	9,5	8,2	6,8
Seixo de Silex	11,0	9,5	7,8

Ex.: Moinho de 3 câmaras

ø int. 1,80 m

1.ª Câmara 14T esferas > 60 mm ø
2.ª » 12,5 » < 60 » ø
3.ª » 23,5 cilindros 22 » ø
m = 0,4

$$P_{CV} = [8{,}5 \times 14 + 8{,}2\ (12{,}5 + 23{,}5)]\ \sqrt{1{,}80}$$
$$= 554 \text{ C. V.}$$

Pelo enorme consumo de energia nas secções de moagem, se verifica a necessidade premente de trazer os moinhos em condições óptimas de funcionamento. Em Portugal, as fábricas de cimento existentes consumiram em 1952 cerca de 68 milhões de kWh que a um preço de $40/kWh representaria 27.200 contos e 80 % desta cifra recai sobre a moagem.

Os moinhos portanto devem ser convenientemente dimensionados, cada câmara possuir um grau de enchimento de esferas, de peso apropriado ao trabalho que se lhe pede, função do tamanho e dureza do material a moer; a velocidade de rotação conveniente e finalmente a granulometria do material com que o moinho é alimentado de harmonia com a composição da carga de esferas. Por exemplo, para obter rendimentos máximos e se o tamanho do grão for de 1 mm consegue-se com 1 câmara, obter um produto fino. Para uma granulometria de 3 a 4 mm, são necessárias 2 câmaras; para 6 a 8 mm, 3 câmaras, etc.

Quando o material de alimentação tiver tamanhos superiores aos indicados, há toda a vantagem em intercalar um britador preliminar, para não obrigar a 1.ª câmara do moinho a fazer o trabalho deste.

A moagem em via húmida difere apenas da moagem por via seca, pela adjunção de água que se faz dentro do moinho. Em vez de farinha obtém-se pasta.

Nos moinhos compound, tudo se passa na via húmida, exactamente como na via seca.

Quando o moinho possui apenas uma câmara, e para afinar o produto, há que recorrer ao circuito fechado, tanto na via seca como na húmida. Após a primeira passagem através do moinho, o conjunto vai a um classificador de força centrífuga e ar na via seca ou a um levigador por corrente de água na via húmida. Neste último caso torna-se necessário como se disse, separar, depois, o excesso da água da levigação em tanques de decantação ou espessadores.

Nas antigas fábricas, os primeiros moinhos usados, eram mós de pedra, como as que hoje se usam para trigo e milho. Dos moinhos rápidos há vários tipos dos quais os principais são constituídos por um corpo cilíndrico, animado de velocidade elevada, contra o qual estão encostados 3 rolos, por meio de molas ou então os de outro tipo, empregam esferas grandes (cerca de 20 cm ø) animadas de movimento de rotação rápido e pela força centrífuga, fortemente premidas contra um caminho de rolamento em forma de meia cana, adaptado às esferas e para dentro do qual se lança o material a moer.

A fig. 11 apresenta um moinho com separador de ar a fig. 12 um pormenor do separador e a fig. 13 um moinho duplo-secador, com alimentação pelos topos, separador de ar e filtro de poeiras.

O trabalho da moagem é controlado constantemente no que respeita à finura do produto, durante a marcha. Com o moinho parado abrem-se as portas de visita e colhem-se amostras por exemplo de metro a metro. Determina-se a finura de cada amostra

e inscreve-se o resultado gràficamente; o diagrama deve apresentar aspecto no género da fig. 14.

Como é natural, o trabalho da martelagem das esferas contra a blindagem para esmagamento da substância a moer, conduz a apreciáveis desgastes de esferas e couraças que são da ordem de 1,5 a 2 kg de aço por tonelada de cimento, só na moagem.

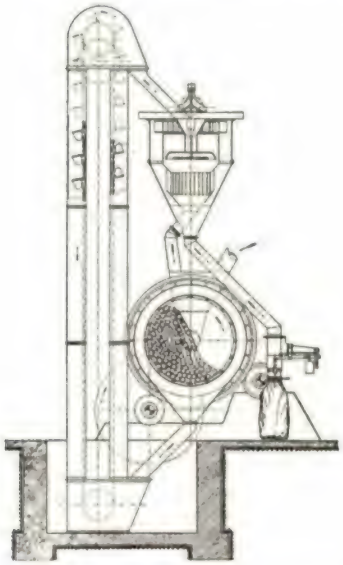


Fig. 11 — Moinho de uma câmara com separador centrifugo

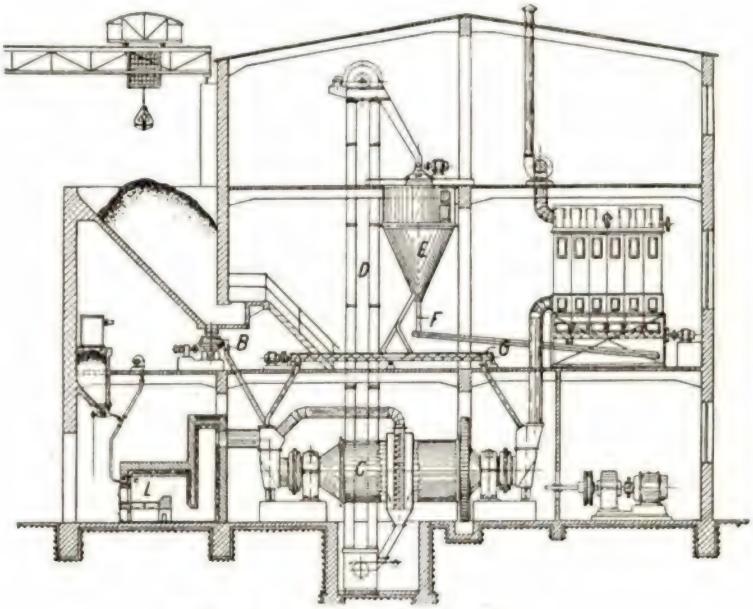


Fig. 13 — Moinho secador duplo

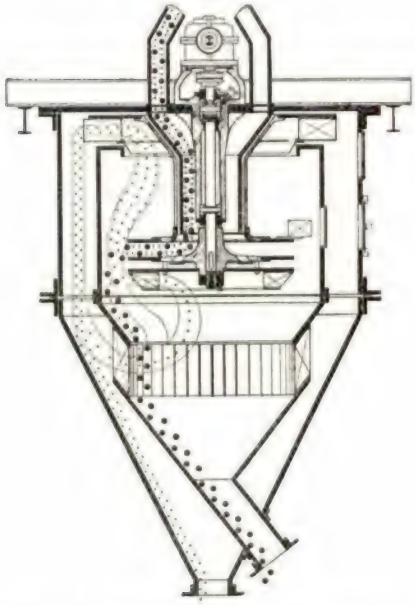


Fig. 12 — Separador centrifugo com circulação de ar

Moinho de 3 câmaras

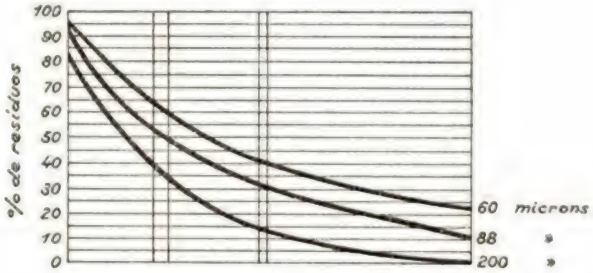


Fig. 14 — Diagrama normal de moagem

O desgaste em aços e metais numa fábrica de cimento é ao todo em média de 3 kg por tonelada.

Em 1953 a produção portuguesa ultrapassou 700.000 t/cimento. Para compensar esse desgaste foi preciso substituir cerca de 2.100 t de esferas, couraças e outros órgãos: 210 vagons de 10 t de peças (um comboio com 1.600 m de comprimento). Com os pro-

gressos na arte de construir, as exigências postas às fábricas de cimento, têm vindo a aumentar sempre, especialmente nas resistências à compressão.

Estes progressos na qualidade, exigem moagens cada vez mais finas dos crus e do clinquer, além de cozeduras mais cuidadas com combustíveis de melhor qualidade.

O diagrama seguinte, fig. 15, mostra a relação entre o consumo específico de energia expresso em quilogramas moídos, por kWh, para um calcáreo normal, para carvão e clinquer médios.

Passando, por exemplo, de um resíduo de 12 % no peneiro de 4.900 malhas/cm² —(88 microns) para 5 % as produções dos moinhos baixam de:

	Resíduo 12 %			Resíduo 5 %
Calcáreo	63	kg/kWh	para	47 kg/kWh
Carvão	45	»	»	33 »
Clinquer	38,5	»	»	47 »

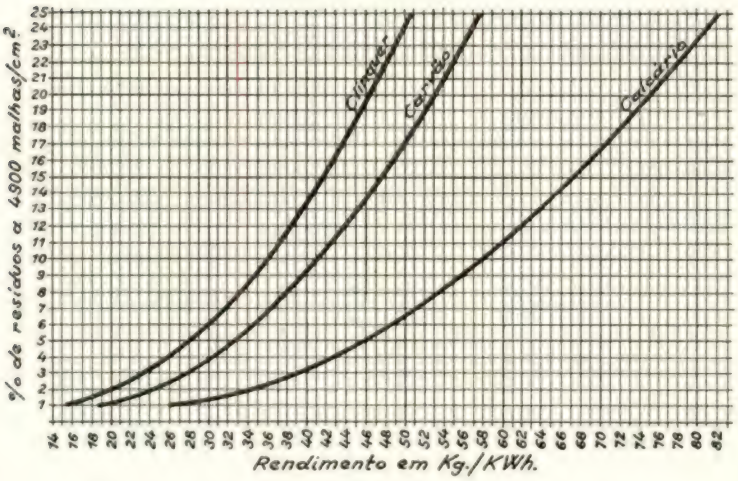


Fig. 15 — Rendimento da moagem em função da finura

Vê-se pois, que os rendimentos dos moinhos sofrem uma redução de

Moinho de cru	40 %
» » carvão	36 »
» » cimento	38 »

Homogenização do cru

À parte uma composição química correcta e suficiente finura da massa crua, há a cuidar a regularidade dessa composição, essencial para um funcionamento correcto do forno e para a qualidade do clinquer a obter.

A moagem é alimentada com as diferentes matérias-primas britadas, doseadas ponderal ou volumètricamente. A composição à saída do moinho e sobretudo o doseamento do carbonato de cálcio é feito com frequência e conforme a natureza da pedra.

É necessário ter bem presente que a subida ou descida da percentagem do carbonato de cálcio de 1 % faz variar a percentagem de silicato tricálcico no clinquer de 14,2 %. Como atrás vimos, isto traz fortes variações nas propriedades técnicas do cimento e daí a extraordinária importância de uma boa homogeneização do cru.

A farinha é conduzida a uma série de células de silo e distribuída regularmente por todas elas. Essas células são munidas, em geral, na sua base, de fluidificadores que permitem a introdução de ar a baixa pressão (1,0 kg/cm^2) e em finíssimo estado de divisão. O efeito do ar nesse estado, é o de comunicar à farinha uma fluidez, que confere extrema mobilidade às partículas de toda a massa e facilita grandemente a homogenização.

Em geral é necessário ainda, para reduzir as oscilações da composição a um mínimo, extrair pneumàticamente farinha, simultâneamente, de todas as células e lançar o conjunto numa outra célula que alimenta o forno.

Faz-se modernamente esse trabalho pneumàticamente, utilizando as bombas especiais para esse efeito.

Em via húmida a operação de homogeneização é muito mais simples, visto fazer-se no estado líquido, para o que bastam tanques e agitadores mecânicos ou pneumáticos, para se obter grande precisão nos resultados.

A cozedura

É a operação fundamental do fabrico.

Dos tipos de fornos existentes, examinaremos apenas o tipo mais vulgar, o forno rotativo.

A secção de homogeneização fornece, ou farinha ou pasta pronta para ser cozida, conforme a preparação foi feita por via seca ou húmida.

Na via seca, a farinha à entrada do forno passa por um amassador onde é humectada com 6 a 8 °/₀ de água ou é granulada em aparelho granulador de tambor ou de prato, com cerca de 10 °/₀ de água. Na via húmida, em que pasta corrente apresenta 35 a 40 °/₀ de água e portanto a sua evaporação obriga a dispêndio elevado de combustível, procura-se eliminar da maneira mais económica essa água cujo papel foi o de facilitar a mistura e homogeneização da composição.

Essa eliminação faz-se nos secadores de pasta com os gases perdidos do forno, seja com cortina de correntes no próprio forno, seja em aparelho especial. Um dos usados em Portugal é o «Calcinator MIAG», constituído por gaiola de barras de aço, animado de movimento lento de rotação e enchida em $^3/_4$ do seu volume com corpos ôcos de aço e de grande superfície. Os gases do forno aquecem esses corpos sobre os quais vem cair a pasta líquida. Do contacto resulta uma evaporação, ficando esses trocadores de calor embebidos em pasta mais ou menos viscosa. Com o movimento de rotação e com os choques repetidos, esses corpos vão largando a pasta seca que cai através das barras do Calcinator para dentro do forno.

O outro sistema é a eliminação, a frio, da água da pasta por meio de filtros de vácuo, constituídos por discos de parede dupla de tecido especial (ùltimamente fazem-se de Nylon), animados de movimento lento de rotação e que vem mergulhar em tanques de pasta.

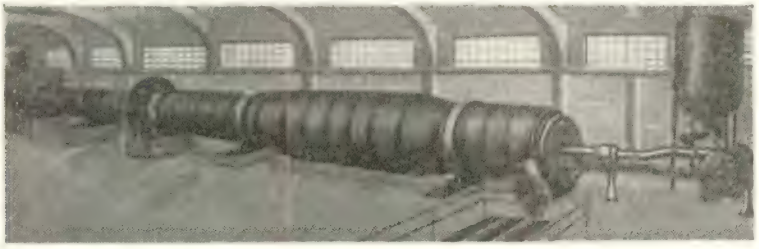
No interior dos discos, provoca-se uma depressão por meio de bomba de vácuo, pelo que a água passa para o interior e o tecido não deixa passar a parte sólida. Consegue-se secar a pasta desta forma até 15 a 20 °/₀ de água.

A farinha ou a pasta encontram-se aptas a serem cozidas e vão entrar no forno rotativo. Esse aparelho, bastante conhecido consta de um grande cilindro de chapa com comprimentos de 50 a 150 metros e diâmetros de 2 a 4 metros, em geral, munido de cintas de rolamento, assentado sobre vários pares de roletes de apoio, e movido por engrenagem comandando a roda de coroa, como indicam as figs. 16 e 17.

A matéria-prima que alimenta o forno, encontra a primeira zona onde se evapora a água (100°), depois passa à região onde a argila perde a sua água de constituição (500°),

avança para a zona de descarbonatação, libertando-se o anidrido carbónico (900°). Depois na zona de temperaturas entre 900 e 1.280° dão-se a maioria das reacções entre a cal e a argila. Além dessa zona de 1.280° aparece a fase líquida onde têm lugar as combinações finais.

Há um tipo de forno rotativo curto associado a uma grelha de preparação, o forno Lepol, criado pelo engenheiro polaco Lellep e realizado pela casa alemã Polysius.



VISTA

CORTE

Fig. 16 — Forno rotativo com arrefecedor em «tandem»

Fig. 17 — Fábrica «Tejo» — O forno 4 e o tanque de pasta

Neste forno, de que há um exemplar em Portugal (Liz) o produto a cozer abandona a câmara Lepol a 900°, de modo que o forno pròpriamente dito tem a seu cargo apenas as reacções que se dão daquela temperatura em diante.

A farinha que vai a cozer neste forno é granulada. Os gases que se escapam do forno a temperaturas vizinhas de 1.000° são aspirados através do leito de grânulos suportados pela grelha Lepol. A transmissão é muito perfeita, pois os gases após a travessia do leito, saem a 100° apenas.

As reacções que se dão à medida que a carga avança no forno, dão origem à formação de:

Abaixo de 800°	Aluminato mono-cálcico
Entre 800 e 900	Silicato monocálcico
» 900 e 1.200	Silicato bicálcico
» 1.200 e 1.300.	Aluminato tricálcico, (aparecimento da fase líquida) e Ferro-aluminato tetra-cálcico
» 1.300 e 1.450.	Formação do silicato tricálcico

Num forno normal com 60 metros, o material a cozer leva em geral 2 $^1/_2$ horas a fazer o percurso. A inclinação dos fornos para permitir o avanço do material é de 3,5 a 5 $^0/_0$ conforme o diâmetro.

Para melhor aproveitamento dos gases da combustão, foi descrito um tipo de secador de pasta e mencionou-se a cortina de correntes que é uso colocar na parte anterior dos fornos para o mesmo efeito. Nos fornos compridos de via seca, para haver um contacto mais íntimo entre os gases e a farinha, adoptam-se deflectores em ferro refractário, que obrigam o gás a contacto mais íntimo com o cru. O outro sistema, também bastante em voga, consiste em recuperar o calor em caldeira apropriada e produzir vapor que se transforma em força motriz. Essa recuperação tem grande interesse técnico-económico. Um dos primeiros fornos montados em Portugal com recuperação produz 240 t/dia de clinquer e 25 a 30.000 kWh ou sejam 1.000/1.250 kW, potência efectiva.

A diferença de consumo de combustível entre este tipo de fornos e o forno Lepol iguala econòmicamente os dois sistemas; o que um recupera sob a forma de vapor, o outro recupera sob a forma de carvão.

Os fornos rotativos são aquecidos ou a carvão pulverizado insuflado ou a óleo.

O forno apresentado na fig. 16 tem a zona de cozedura alargada, com cerca de 10 m de comprimento; esta última parte da cozedura onde se produz a clinquerização ou vitrificação, dura cerca de 20 minutos, admitindo uma rotação uniforme do forno (uma rotação por minuto). Como esta reacção se dá no estado pastoso, necessita da temperatura conveniente e de tempo. O comprimento da chama tem muita importância, pois dela depende o comprimento da zona de cozedura. Se a chama é curta em demasia, a zona diminui e o material não tem tempo de cozer normalmente. Se é comprida demais a quantidade de calor irradiado por unidade de superfície é insuficiente e a cozedura faz-se em más condições. Repare-se que em geral o material a cozer ocupa apenas $^1/_3$ do perímetro interior. A chama aquece pois igualmente $^2/_3$ do perímetro refractário do forno. O aquecimento do material faz-se pois por irradiação directa da chama e, indirectamente pelo contacto do revestimento refractário, aquecido a alta temperatura com a massa, à medida que o forno vai rodando.

O carvão pulverizado é insuflado para o forno por ventoinha sob uma pressão de 300 o 400 mm de água. Este ar primário, o suficiente para arrastar o carvão é em geral frio. O ar restante necessário à combustão do carvão deve ser fortemente aquecido, por razões de ordem económica. Esse calor é-lhe fornecido por meio dos arrefecedores de clinquer, que são geralmente do tipo cilíndrico rotativo independente, do tipo barrilete ou de grelha.

A grande maioria dos fornos rotativos é aquecida a carvão pulverizado. O queimador assemelha-se a um grande bico de Bunsen; no entanto a queima de gás de iluminação é mais simples do que a de carvão pulverizado. O gás de iluminação inflama-se fàcilmente e arde no ar, à temperatura normal, enquanto que o carvão pulverizado só arde em câmara fortemente aquecida, à temperatura pelo menos do rubro cereja. O gás de iluminação é um produto distilado pronto para arder, enquanto que o carvão pulverizado é

um produto que só distila desde que encontre a temperatura de clinquerização ambiente, transformando-se em coque e gás e o coque por sua vez arde, dando gás carbónico e cinza.

O carvão deve ser suficientemente fino e seco para flutuar no ar primário do ventilador, e a distribuição do carvão nessa corrente de ar deve ser feita com toda a regularidade, de modo a manter a chama com um certo e determinado comprimento e a combustão se fazer nas melhores condições.

É compreensível que, no caso de carvões com grande percentagem de cinza, a sua presença na zona das temperaturas elevadas, provoque alterações de natureza química na massa e seja favorável à formação de anéis, verdadeiras barragens circulares, que chegam a obstruir o forno.

As partículas de pó de carvão à entrada no forno, distilam tanto mais ràpidamente quanto mais finas forem. Com carvão de moagem grosseira, as partículas de coqueformado, ardem lentamente e vão cair sobre o clinquer pastoso, o que se conhece pelas faúlhas emitidas por este, provocando fenómenos de redução nocivos e a aparição de ferrosilicatos fusíveis que com a cinza formam anéis à boca do forno.

Sendo o carvão de moagem extra-fina, a combustão é muito rápida e à ponta da chama, que é a sua zona mais quente (cerca de 2.000°) chegam só partículas inteiramente transformadas em cinza, partículas que se liquefazem àquela temperatura e são projectadas em forma de chuva à entrada da zona de clinquerização. O ideal será portanto um carvão com uma moagem média, cuja velocidade de combustão seja tal que atinja a ponta da chama, sem chegar ao estado líquido e possa ser arrastado sob a forma de cinza pela tiragem da chaminé, causando o menor número de perturbações possível na massa a cozer.

Nos fornos rotativos o carvão mais conveniente deverá ter à volta de 15 a 20 °/₀ de matérias voláteis e uma percentagem mínima de cinza.

A produção portuguesa ultrapassando 700.000 t/anuais de cimento, necessita de aproximadamente 200.000 t de carvões (20.000 vag. de 10 t).

A Economia Nacional e a Direcção-Geral dos Combustíveis reclama que se consuma o máximo possível, se não a totalidade, de carvões nacionais para evitar a drenagem do ouro com a compra de combustível estrangeiro.

Para arranjar com carvões nacionais os 15 a 20 °/₀ de matérias voláteis, temos que misturar as antracites da região do Porto que tem 2 a 3 °/₀ de matérias voláteis com as lenhites do jurassico, das quais o mais importante jazigo é o do Cabo Mondego com cerca de 30 °/₀ de voláteis.

É esta a primeira dificuldade, para se obter uma chama equilibrada, onde há 2 carvões com características de inflamabilidade tão diferente, a lenhite ardendo ràpidamente e a antracite ao contrário, de inflamação custosa e necessitando de temperaturas elevadas. E no capítulo matérias voláteis há também que ter em conta o seu poder calorífico para se conseguir obter uma chama capaz. Temos lenhites em Portugal, em que o poder calorífico das matérias voláteis anda por 2.500 cal/kg apenas e há um carvão no nosso império ultramarino (Moatize) onde esse poder calorífico atinge 8.500 cal/kg.

Quanto a cinzas, é difícil conseguir uma mistura com carvões nacionais com percentagem abaixo de 30 °/₀, com um poder calorífico inferior do carvão seco, de mais de 4.900 a 5.000 cal kg.

O autor Anselm, presidente da Comissão de Fiscalização da indústria cimenteira alemã, apresentou na revista «Zement» [1] um extenso estudo sobre este assunto, onde conclui que para um trabalho normal dos fornos, se exige um mínimo de 5.500 cal/kg nos carvões.

Daqui se pode ver a dificuldade com que lutam os técnicos portugueses para conseguir fazer bons cimentos com combustíveis tão ordinários e nisso diga-se em abono da

---

[1] Ver «Zement», Junho 1952; págs. 189-193.

verdade, têm sido extraordinários. Nos últimos tempos tem-se estado a montar queimadores de mazute, para trabalharem em simbiose com o carvão pulverizado e assim se poder conseguir dominar o problema das cinzas.

O problema é mais agudo na via húmida, devido à viscosidade das pastas e sua secagem, do que na via seca, onde se consegue que as chaminés eliminem cerca de 50 % do total de cinzas.

Moagem do clinquer

Já nos referimos a generalidades sobre moagem e aos diferentes tipos de moinhos.

Na moagem do clinquer põe-se o problema de saber até que finura é conveniente moer e qual a melhor composição granulométrica do cimento.

Até há pouco tempo relativamente, as características da moagem do cimento eram expressas em resíduos da peneiração através de certas e determinadas malhas das quais as mais usuais eram e são o peneiro de 900 malhas/cm^2, com 200 microns de abertura, o peneiro de 4 900 m cm^2 com 88 microns e o peneiro de 10.000 malhas/cm^2 com 60 microns. No entanto este género de peneiração não nos dá indicações sobre a composição granulométrica da fracção que atravessa os diferentes peneiros. Em sua substituição, está actualmente em uso a determinação da superfície específica da substância moída, conquanto essa determinação seja bastante complicada. As normas americanas e inglesas indicam o permeabilímetro de Blaine, por meio do qual e segundo um método determinado, se mede a permeabilidade ao ar dum cilindro repleto de pó de cimento.

Essa permeabilidade está relacionada com a superfície específica, que um método simples de cálculo permite determinar.

Na América, usa-se também o Turbidímetro de Wagner, um aparelho por meio do qual se mede por célula foto-eléctrica a turvação de uma suspensão de cimento em líquido apropriado. O grau de turvação permite calcular a superfície específica. O número que a representa difere muito daquele que nos fornece o permeabilímetro.

No estado actual da técnica só podemos garantir que 2 cimentos têm a mesma finura, quando apresentem a mesma superfície específica, medida pelo mesmo método. A comparação de finuras pelo método dos peneiros só pode ser admitida se o clinquer foi moído em moinho do mesmo tipo pois num moinho compound moendo em circuito aberto, a composição granulométrica do cimento resultante, é completamente diferente daquela que se obtém num moinho ventilado e em circuito fechado. A corrente de ar arrasta consigo todas as partículas que tenham atingido determinado calibre, de modo que neste tipo de moinho resulta um cimento de grão mais regular no tamanho, mas isento de partículas ultrafinas.

Por essa razão comparando o produto obtido nestes 2 tipos de moinho, encontram-se resultados concordantes no resíduo nos peneiros, mas com superfícies específicas discordantes, pois os ultrafinos que passam despercebidos nos peneiros, marcam o aumento que conferem à superficie específica.

Todos sabemos que os vazios de um conjunto de esferas é máximo, quando as esferas forem de igual diâmetro e os vazios vão diminuindo à medida que for aumentando a diversidade de tamanho das esferas que se vão encaixando nos vazios uma das outras.

A hidratação do cimento é um fenómeno superficial. A água em contacto com o grão de cimento reage com ele e penetra lentamente na profundidade de uns escassos microns. A progressão no endurecimento é proporcional à progressão na penetração da água. Esse fenómeno é posto em evidência com a seguinte experiência: Confeccione-se um provete de pasta pura de cimento. Ao fim de certa idade, ensai-se o provete e verifique-se a resistência atingida. Tome-se o mesmo provete e reduza-se a pó em moinho de laboratório. Com o pó obtido confeccione-se novo provete e ensaie-se ao fim do mesmo tempo. Chega-se a obter resistências da ordem de 60 % da resistência inicial. Pulverize-se

pela segunda vez o mesmo provete e repita-se o ensaio. Encontra-se novamente ainda resistência apreciável. Quer isto dizer que a 2.ª e 3.ª pulverização fendeu os grãos primitivos de cimento e expoz ao contacto da água superfícies que ainda não tinham sido hidratadas.

É compreensível, pelo menos teòricamente que se levássemos a moagem a uma finura extrema, deixaria de ser substância pulvurulenta para se aproximar de substância gasosa. Mas mesmo sem atingir este limite compreende-se que nessas grandes finuras a reacção do corpúsculo com a água deveria ser instantânea e naturalmente ficaria como a cal hidratada, no estado pastoso sem conseguir endurecer. O endurecimento hidráulico exige tempo para que as reacções lentas do processo de hidratação possam ter lugar. Destas considerações resulta que a moagem do cimento deve ser levada até uma finura grande, mas não até um produto superfino; deve ter grão misto, cuja capacidade de endurecimento seja proporcional à superfície específica atingida.

Quanto à presa do cimento, é ela rápida em demasia, quando moemos o clinquer sem qualquer adjunção e dificulta muito a sua aplicação. É necessárro juntar em pequena dose (à volta de 3 %) um retardador dos quais o mais comum é o gesso natural, $So^4Ca, 2OH^2$.

A acção do gesso sobre a presa do cimento está indicada no gráfico 18. Veja-se que a acção de gesso de presa semi-hidrato é completamento diferente do gesso cru, bi-hidrato.

O fornecimento de cimento de presa muito rápida (sem gesso) ou normal, não apresenta dificuldade. Porém entre esses 2 limites, garantir com rigor, certo e determinado tempo de presa é difícil pois a acção do gesso, como a curva indica, não é regular. É preferível nessas condições utilizar um acelerador de presa, o carbonato de sódio, por exemplo, dissolvido na água de amassadura em proporções que se determinam experimentalmente com simples provetes amassados com proporções crescentes de carbonato de sódio na água (4, 5, 6 e 8 %) até se encontrar o tempo de presa conveniente.

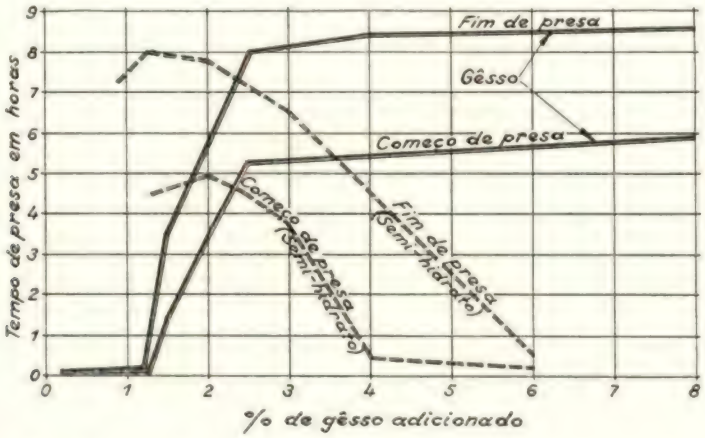


Fig. 18 — Acção do sulfato de cálcio sobre a presa do cimento

Propriedades do Cimento Portland: De todas as propriedades que exigem ao cimento Portland as resistências mecânicas são as mais importantes e as únicas a que comentaremos aqui.

Os Cadernos de Encargos fixam um mínimo de resistência à tracção e compressão em geral para os 3, 7 e 28 dias. A maneira de confeccionar os provetes, granolometria da areia, o coeficiente água-cimento, influenciam muito os resultados obtidos.

Os Cadernos de Encargos variam infelizmente consideràvelmente de país para país.

Acontece neste momento estar Portugal a exportar cimento para diversos países, e cada qual exige que o produto satisfaça ao respectivo caderno de encargos. Por esse

motivo temos neste momento que estar instrumentados para ensaiar cimento pelo método português, inglês, francês, turco, brazileiro e norte-americano. O cimento que as barragens nacionais em construção, estão consumindo é ensaiado pelo método suíço. Isto obriga a importar areias normais oficiais de todos esses países, e possuir aparelhagem própria pois a natureza e granulometria da areia tem forte preponderância nas resistências em argamassa. O ensaio de pasta pura de cimento está posto de lado em toda a parte.

Esta nossa Lisboa que tantos congressos tem albergado, reuniu também este ano dentro dos seus muros, os membros da Rilem (Reunion Internationale des Laboratoires d'Essai de Matériaux), prestimosa associação de técnicos europeus especializados. Um dos seus fins é procurar um acordo entre os Laboratórios Oficiais de Ensaio de Materiais, por forma a que eles por seu lado influenciem os respectivos governos a fazer uma unificação internacional dos Regulamentos de ensaio dos cimentos.

Nessa ordem de ideias, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil está levando a cabo neste momento um interessantíssimo trabalho, no qual colaboram todas as fábricas nacionais e todos os laboratórios que se ocupam de ensaios destes, em que está a ser posta em prática a doutrina emanada desse Congresso da Rilem.

O seu fim imediato é fornecer elementos sérios à Comissão encarregada da Revisão do actual Caderno de Encargos, que está já muito antiquado (1930). É de esperar que o novo Regulamento contribua para o progresso desta indústria que tem estado ùltimamente a concorrer aos mercados internacionais e ultramarinos com honrosos resultados; a exportação passou neste último ano de 100.000 toneladas.

Outros tipos de cimento

a) *Cimentos de escória* — No primeiro quadro apresentado com a classificação dos aglomerantes hidráulicos, mencionaram-se os cimentos de alto forno, nome que deriva apenas da utilização da escória, sub-produto daquele tipo de forno siderúrgico. Como se disse, diferem o cimento Portland ferro do cimento de alto forno, apenas pela percentagem de escória, sendo aproximado de 30 % no primeiro e 70 % no segundo e entre estes 2 limites pode haver todas as proporções.

Estes tipos de cimento utilizam-se nas obras onde se pretende baixo calor de hidratação e resistêucia aos sulfatos. A libertação de $(OH)_2$ Ca durante o fenómeno da presa do cimento vai fazer despertar a hidraulicidade latente na escória, excitando-a.

b) *Cimento Super-Sulfatado* — Se essa «excitação» for provocada pelo gesso como catalisador, quer sob a forma de bi-hidrato natural SO^4 Ca, $2\,OH^2$, gesso de presa, semi-hidrato, SO^4 Ca, $^1/_2$ OH^2 ou de anhidrite, estamos em presença de um aglomerante que nestes últimos anos se tem vindo a desenvolver e a impor-se, o «Cimento Super-Sulfatado». A composição corrente deste cimento é de 85 a 90 % de escória e de 10 a 15 % de gesso. Aconselha-se a moer separadamente cada um dos componentes a finuras de 2 a 5 % a 4.900 malhas e de fazer posteriormente a mistura, a fim de que a reacção se não comece a produzir no moinho.

O cimento conserva-se mal e as resistências baixam com a armazenagem. Corrige-se este inconveniente com uma adjunção de uma pequena dose de cal. Segundo Kühl é o anidrido carbónico do ar o responsável por esse mau comportamento.

Têm-se feito adições pequenas de cimento Portland a este cimento super-sulfatado; convêm não ir além de 5 % pelo perigo da formação de sulfo-aluminato.

Este cimento apresenta resistências muito elevadas igualando pelo menos as do cimento Portland e apresenta também uma retracção menor que este.

Até há pouco tempo, podia dizer-se que era axiomático o princípio da moagem seca de todos os aglomerantes hidráulicos. Actualmente aplicou-se a moagem húmida à

escória. Como esta substância tem hidraulicidade latente, enquanto se não junta o «excitante» que desperte o fenómeno, não há inconveniente em manter a escória sob a forma de uma lama fria, tanto mais que o rendimento da moagem húmida é superior ao da moagem a seco.

Quando se lhe junta o catalisador, sob a forma de sulfato ou de cloreto, mesmo em pequenas doses, desperta a reacção e o endurecimento começa a produzir-se. A única dificuldade está em conseguir misturar convenientemente, com boa homogenização o catalisador por toda a massa.

Este sistema foi utilizado ùltimamente na construção de uma barragem em Espanha.

c) *Cimento aluminoso* — Nesta classe de cimento, os elementos activos deixam de ser os silicatos de cálcio e são substituídos pelos aluminatos de cálcio.

A percentagem necessária de aluminatos exige o emprego de bauxite, matéria-prima existente em França em Beaux, na Hungria e na Istria.

A outra matéria-prima é o calcáreo.

A principal diferença nas condições de formação do cimento aluminoso em face do cimento Portland, está em que o intervalo de temperatura, entre o começo de amolecimento e a fusão completa é extraordinàriamente diminuto, enquanto que no cimento Portland esse intervalo de temperatura é muito grande.

Portanto o cimento aluminoso ou se forma por fusão completa, recção em fase líquida a relativamente baixa temperatura ou a reacção se dá na fase sólida por ustulação ou fritagem.

No 1.º caso utiliza-se o forno eléctrico de arco, que fornece o chamado cimento fundido, e no 2.º um forno tipo manto de água (water jacket) cuja construção é toda inspirada no alto-forno. A matéria-prima é introduzida juntamente com o coque, como naquele forno. Também tem havido tentativas na América para cozer cimento aluminoso em forno rotativo; as dificuldades são muito grandes, precisamente devido ao pequeno intervalo que existe entre o princípio do amolecimento e a fusão completa. Na zona de cozedura produz-se liquefação total, seguida de uma solidificação muito rápida, que provoca obstruções.

O cimento fundido apresenta resistências iniciais extremamente elevadas, acompanhadas como seria de prever com forte elevação de temperatura. Resiste especialmente bem às águas sulfatadas. Não deve ser misturado com cimento Portland e mesmo com cal, pois resultam presas extremamente rápidas.

d) *Cimento Pozolânico* — Em países como Portugal onde se não dispõe ainda de escórias de alto forno, mas onde possuímos magníficas pozolonas naturais (Açores e Cabo Verde) e argilas caoliníferas próprias para o fabrico de pozolanas artificiais, este tipo de cimento apresenta bastante interesse, pois tem aplicações semelhantes ao Cimento de Escórias para obras onde se exija calor de hidratação moderado e resistência aos sulfatos, sobretudo para trabalhos marítimos. Com efeito, a pozolana junta ao cimento, desempenha papel de substância inerte quanto ao calor de hidratação, isto é, o abaixamento do calor de reacção é, com aproximação, proporcional à percentagem de pozolana adicionada.

Em relação às resistências, no período inicial, 3 e 7 dias a pozolana actua como inerte, porém com a idade a actividade pozolânica entra em jogo as resistências crescem e ao fim de certo período atingem ao do cimento. À agressividade das águas sulfatadas, resiste o cimento pozolânico especialmente bem. Há muito pouca literatura sobre esta acção pozolânica. A recentíssima publicação de Bogue refere-se aos ensaios de Bussem [1],

---

[1] Bogue: Química del Cimento Portland, pág. 585.

dizendo que a acção pozolânica se traduz pela formação de sílico-aluminato bicálcico C_2AS.

Baseado neste trabalho, Hendrickx apresenta para o fenómeno pozolânico a seguinte explicação:

1.º) A *sílica solúvel de pozolana* reage com o aluminato tricálcico C_3A do cimento formando a sílico-aluminato bicálcico (Bussem) C_2AS, que cristaliza em vez do C_3A no cimento normal, libertando uma molécula de CaO:

$$C_3A + S = C_2AS + C$$

2.º) Simultâneamente, a *alumina solúvel da pozolana* fixa também, molécula por molécula, sílica solúvel com 2 moléculas de CaO, provenientes da reacção antecedente, ou então da decomposição do C_3S e C_2S durante a hidrolise do endurecimento do cimento.

3.º) O excedente de *sílica solúvel* de pozolana combina-se com a cal posta em liberdade pela hidrólise da C_3S e C_2S, uma vez esgotada a que libertou o C_3A.

4.º) Há 3 hipóteses de composição dos silicatos de cálcio hidratados, formados depois da sua hidrólise e endurecimento na água:

a) Le Chatelier admite o silicato monocálcico CS.aq.;
b) Trabalhos recentes demonstram a formação do composto C_3S_2 (Bogue);
c) A hipótese do C_2S não hidrolisável em presença de água saturada de cal, mas cristalizando por simples hidratação, é também admitida (Bogue).

Esta teoria, ainda inédita, foi-me comunicada pelo autor; o trabalho de investigação e estudo neste sector está neste momento em curso.

e) *Cimento sulfo-aluminoso* — O clinquer de cimento Portland, pode, como vimos, ser adicionado a substâncias várias de hidraulicidade latente.

O clinquer de cimento fundido não pode ser aplicado da mesma forma em cimentos mistos e a razão é que as reacções que provocam o endurecimento são outras: Pela hidrólise não se forma hidrato de cálcio, mas sim hidróxido de alumínio e portanto não está em condições de «excitar» ou de servir de catalisador à escória.

No entanto em França, a Sociedade Pavin de Lafarge apresentou um cimento a que chama *Sulfo-aluminoso* obtido por mistura de cimento aluminoso com gesso; o endurecimento é provocado pela formação de sulfo-aluminato de cálcio.

A firma Poliet et Chausson fabrica um cimento *sulfo-aluminoso,* que obtém por cozedura em forno rotativo de uma pasta contendo 50 % de gesso, 25 % de bauxite vermelha e 25 % de cal; a temperatura de vitrificação é mais baixa do que a que exige o cimento Portland normal. Este cimento, criado pelo Eng.º Hendrickx, director técnico daquela sociedade, apresenta especiais qualidades de resistência aos agentes agressivos. Não foi lançado no mercado por ser proibitivo o seu custo de produção. Tem sido empregado como base para os ensaios e fabrico do cimento sem retracção e expansivo.

f) *Cimento sem retracção* — Um dos grandes inconvenientes de todos os nossos ligantes hidráulicos é a nefasta propriedade de se retraírem e portanto no dia em que tivermos à mão um cimento isento dessa propriedade ter-se-á dado um grande passo na senda do progresso.

À primeira vista parece que, sabendo nós criar cimentos expansivos e sendo os cimentos normais «retractivos», seriamos capazes de arranjar o tal ligante equilibrado em que a expansão fosse igual e de sinal contrário à retracção.

A prática veio no entanto mostrar que é difícil conjugar no tempo, as tendências antagónicas; o período da expansão é mais curto que o da retracção; esta ainda actua ao fim de um longo período.

Mesnager, membro do Instituto de França, promoveu a realização de numerosos ensaios destinados a contrariar a retracção, pela adjunção ao cimento Portland de vários sais, sem resultados apreciáveis. De colaboração com o Eng.º Hendrickx, começaram os resultados a ser satisfatórios e conseguiu obter o germe da expansibilidade que procurava, com a adjunção de cimento sulfo-aluminoso ao cimento Portland.

Admite a hipótese que a retracção seria provocada pelos compostos coloidais que se formam durante a presa e desde que existisse um esqueleto cristalino de sulfo-aluminato de cálcio, este combateria a retracção.

Mas para que da expansão desejável se não vá parar a uma expansão indesejável, é preciso poder travá-la a tempo e conseguir «estabilizar» o cimento

Este estabilizador é a escória granulada Tem sido o Eng.º Lossier o promotor dos ensaios da aplicabilidade deste novo aglomerante continuando ainda actualmente com o contrôle tecnico dos estudos e aplicações. As revistas da especialidade referem-se a ensaios já coroados de êxito, confirmando estes trabalhos.

Parece no entanto que as proporções de mistura do cimento Portland, sulfo-aluminoso e escória têm que ser mantidas dentro de limites muito estreitos, com granulometrias próprias, perfeitamente determinadas.

Façamos votos para que em breve os técnicos da construção possuam esse cimento «estabilizado» sem retracção.

E com estas considerações dou por finda esta despretenciosa palestra, tendente a apresentar algumas facetas desta indústria que emprega hoje em Portugal uns trinta engenheiros, quase todos saídos dos bancos desta escola, e agradecer a V. Ex.as a benevolência que usaram para comigo, escutando-me durante tanto tempo.

TABELAS TÉCNICAS

Estando em preparação uma nova edição das Tabelas Técnicas vem a Direcção da «Técnica», por este meio, pedir aos Técnicos Portugueses que tenham algo a propor, no sentido da sua melhoria, que o façam com a possível brevidade.

Desde já, a todos a Direcção da «Técnica» muito agradece.

C. D. 621.311.15/9

Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional

— Elementos extraídos das estatísticas mensais do Repartidor Nacional de Cargas (R. N. C.) preparadas nos Serviços do R. N. C. a cargo da Companhia Nacional de Electricidade —

NOTA: *A produção e o consumo da rede das empresas do R. N. C. representam actualmente cerca de 90 % dos respectivos totais do País.*

NOVEMBRO

I — Elementos gerais

a) Mensais (mês de Novembro) 10^6 kWh

	1952	1953	Variação %
Produção hidráulica (P_h)	70,9	101,9 (2)	+ 44
Produção térmica (P_t) . .	25,4	5,9 (3)	— 77
Produção total (P_T) . . .	96,3	107,8	+ 12
Cons. electroquímico (C_{eq})	1,8	8,5	+ 364
Outros consumos ($C_T - C_{eq}$)	80,2	83,3	+ 4
Consumo total (C_T) (1) . .	82,0	9,8	+ 12
Energia recebida de Espanha	0,2	0,6	+ 200

b) Acumulados (desde o início do ano, isto é, de 1 de Janeiro a 30 de Novembro) 10^6 kWh

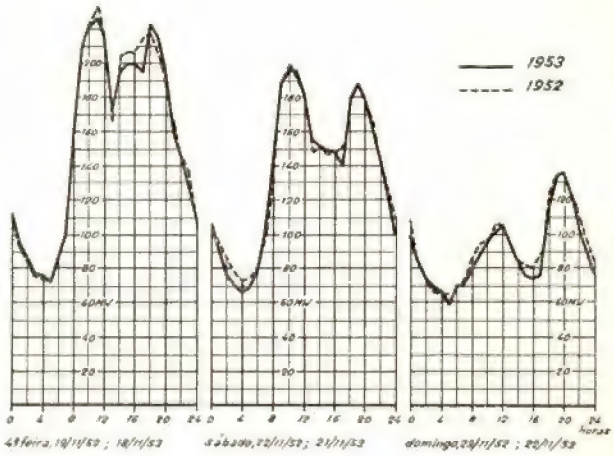
	1952	1953	Variação %
Produção hidráulica (P_h)	1.017,2	824,6 (4)	— 19
Produção térmica (P_t) . .	85,6	322,7 (5)	+ 276
Produção total (P_T) . . .	1.102,8	1.147,3	+ 4
Cons. electroquímico (C_{eq})	168,9	118,4	— 30
Outros consumos ($C_T - C_{eq}$)	785,5	866,1	+ 10
Consumo total (C_T) (1) . .	954,4	984,5	+ 3
Energia recebida de Espanha	0,2	1,1	+ 450

Notas:

(1) No consumo total (C_T) estão incluídas as perdas nas redes de transporte e de distribuição.
(2) 95 % P_T. (3) 5 % P_T. (4) 72 % P_T. (5) 28 % P_T

II — Diagramas de carga da producão

	4.ª feira: 19-11-952; 18-11-953	
	1952	1953
Produção hidráulica (P_h) — MWh	1.630	3.556
Produção térmica (P_t) — MWh . .	2.113	249
Produção total (P_T) — MWh . . .	3.743	3 805
Utilização da ponta (U) — horas	40	0
Factor de carga (α)	16,2	16,6
Relação $\frac{\text{Pot. mín.}}{\text{Pot. máx.}}$ (r)	0,68 0,30	0,69 0,31

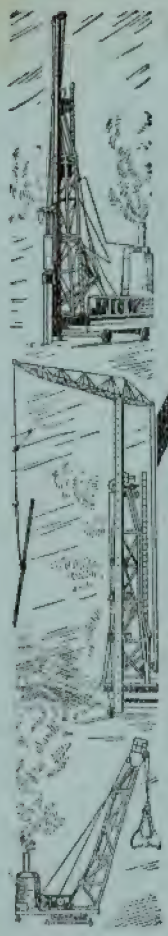


III — Energia armazenada nas principais albufeiras no fim do mês de Novembro de 1953

Albufeira	Energia armazenada	
	10^6 kWh	% (1)
Venda Nova	25,9	24,3
Salamonde	8,3	60,3
Guilhofrei	1,5	17,8
Lagoa Comprida	9,3	39,9
Santa Luzia	7,6	22,5
Castelo do Bode	61,1	37,2
Pracana	6,5	62,9
Póvoa	2,7	15,4
Total (2)	122,9	32,1

Notas:

(1) Coeficiente de enchimento em energia.
(2) Total da rede das empresas do R. N. C.

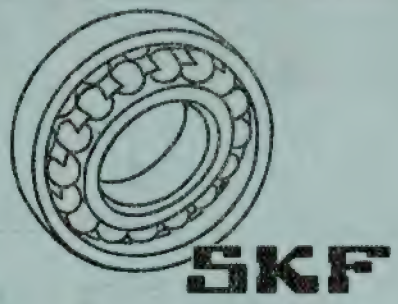


BATE-ESTACAS
«MENCK»
MODELO MR-18, COM TRANSPORTADOR AVANÇADO; ESTRUTURA TUBULAR, MARTELO-PILÃO SEMI-AUTOMÁTICO E CALDEIRA DE VAPOR

Representantes em Portugal:

Sociedade Michaëlis de Vasconcellos, L.da
PORTO — Praça da Liberdade, 114

Eng.o J. E. Michaëlis de Vasconcellos
LISBOA — R. Fialho de Almeida, 1



ROLAMENTOS
CHUMACEIRAS

LISBOA PRAÇA DA ALEGRIA 66-A Telef. 33995-34223
PORTO AV. DOS ALIADOS 150-152 Telef. 29776-29777

LABORATOIRE DAUPHINOIS D'HYDRAULIQUE

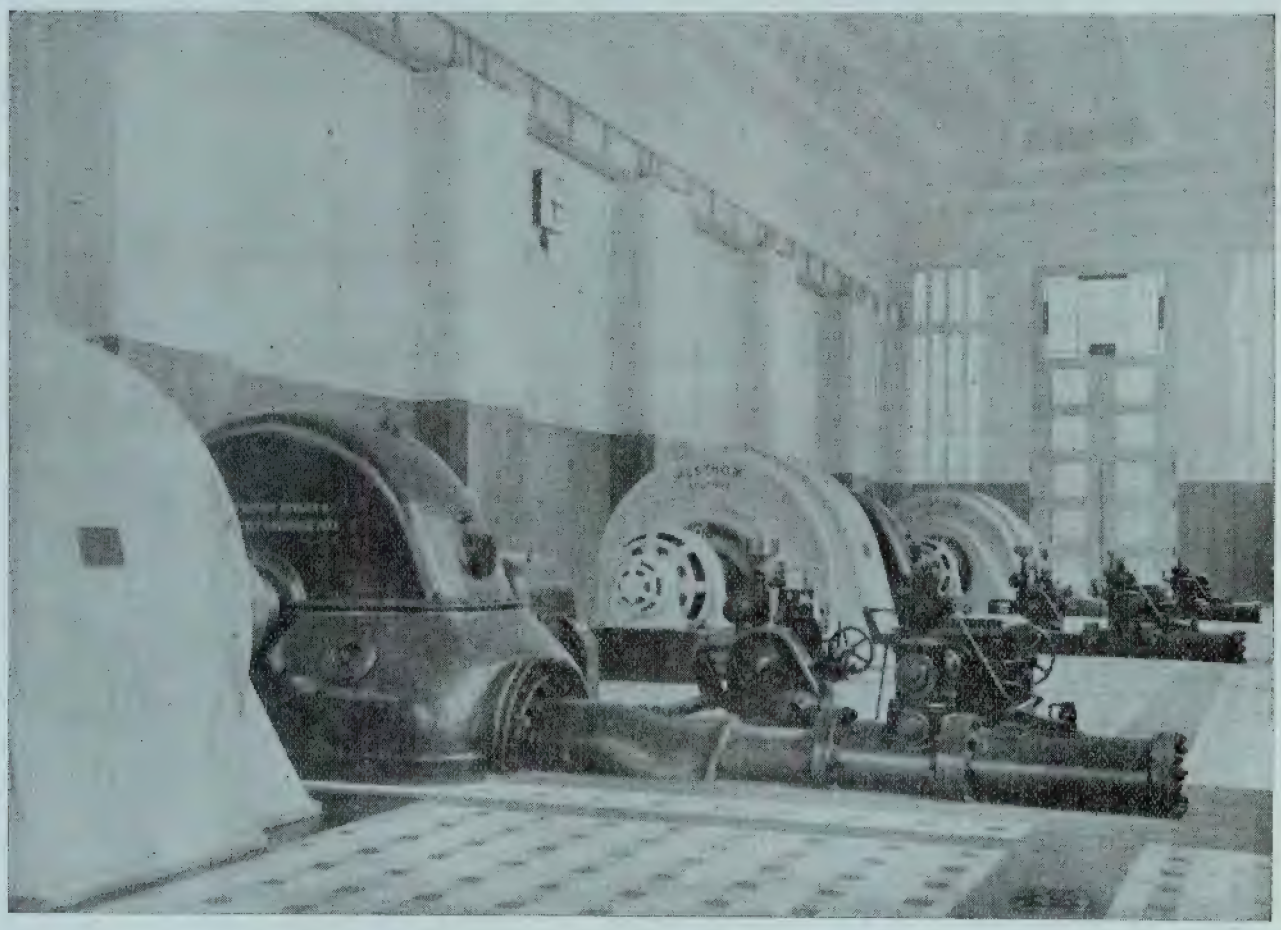
GRENOBLE

LABORATÓRIO DE ENSAIOS HIDRÁULICOS

EQUIPAMENTOS DE QUEDAS DE ÁGUA

HIDRÁULICA AGRÍCOLA — REGA

EQUIPAMENTOS DAS GRANDES BARRAGENS



Central de «BISSORTE»

3 turbinas **"PELTON"** de 40.000 CV, s/1.130 m.

EM PORTUGAL:

LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA
NA AMADORA

"NEYRPIC"

R. Vice-Almirante João António de Azevedo Coutinho

AMADORA Telef. VENDA NOVA 48

C. D. 624.13

A MECÂNICA DOS SOLOS: SEU PAPEL NA ENGENHARIA CIVIL [1]

POR MANUEL ROCHA
Engenheiro Investigador, Chefe de Serviço,
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

1. Solos: definição e generalidades

1.1 — *Solos e rochas*

O engenheiro civil tem uma necessidade constante de ter em consideração o comportamento, tão variado, dos materiais que constituem a crusta terrestre, pois é sobre eles que funda as suas obras e deles se serve muitas vezes como material de construção.

Visto na engenharia civil interessar sobretudo a consideração da capacidade de resistência desses materiais, isto é, a sua aptidão para manter as formas quando actuados por solicitações, tal capacidade foi tomada, desde longa data, como critério da sua classificação. Deste modo se foi conduzido, sem preocupação de rigor, a agrupar os materiais que constituem a crusta em solos e rochas.

Porém, ao iniciar-se um curso de Mecânica dos Solos surge a tentação, a que não escapamos, de apresentar uma definição cuidada de solo. Ora, dada a gama tão variada de materiais aos quais se dá correntemente a designação de solo e, sobretudo, dado o facto do conhecimento do comportamento de tais materiais estar em plena evolução, não sendo definidas as fronteiras das teorias que procuram interpretar esse comportamento, não é possível nem conveniente procurar estabelecer uma definição muito elaborada. Serão os próprios âmbitos de aplicabilidade das teorias em elaboração que acabarão por impor a definição mais apropriada de solo. De facto, e é sempre oportuno relembrá-lo, as definições são arbitrárias sendo sòmente o critério do rendimento da sua utilização que conduz a uma escolha.

Seguindo Terzaghi e Peck [2] designamos por solo um conjunto de partículas minerais, podendo conter matéria orgânica, que são separadas fàcilmente por agitação dentro de água. Por exclusão, rocha é um agregado de partículas minerais que não se separam por tal processo [3].

Como é óbvio, há materiais que ficarão incluídos numa ou noutra das categorias definidas conforme a intensidade com que for feita a agitação. É o que acontece em certa fase do processo de fissuração progressiva das rochas que acaba por conduzir aos chamados solos residuais. Os saibros graníticos, tão correntes no norte do país, encontram-se por vezes nessa situação intermediária entre solo e rocha.

Os solos são em geral formados a partir da acumulação de produtos de erosão de rochas ou de outros solos, podendo estes produtos ser transportados pelas águas, pelos ventos ou pelos gelos. Tais solos são designados transportados.

Entre nós os solos mais comuns e que mais interessam ao engenheiro civil são os solos transportados pelas águas.

Segundo a definição dada, são solos quer os conjuntos de partículas não agregadas, como as areias, os quais são designados solos incoerentes, quer os conjuntos com coesão, como as argilas, designados solos coerentes.

---

(1) Este trabalho constitui o primeiro capítulo do Curso de Mecânica dos Solos organizado, em Dezembro de 1952, pela Comissão de Mecânica dos Solos da Ordem dos Engenheiros. Esse curso será publicado brevemente.

(2) Terzaghi, Peck, «Soil Mechanics in Engineering Practice», John Wiley and Sons, 1948, pág. 4.

(3) Estas definições são as que figuram no «Vocabulário de Estradas e Aeródromos», Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2.ª edição, 1951. Este Vocabulário é seguido em todo o presente trabalho.

Designamos genèricamente por maciço um sólido constituído por um solo. Maciços naturais são os constituídos por solos jazendo no próprio local da sua formação, e maciços artificiais são os construídos pelo homem.

As rochas, tal como foram definidas, apresentam em geral uma resistência muito superior à dos solos e a maior parte das vezes suficientemente elevada para dispensar a necessidade do estudo do seu comportamento.

Mas pergunta-se: a quem cabe o estudo, quando necessário, dos problemas postos pelas rochas? Tal estudo deve ser conduzido pelo especialista de solos dada a afinidade entre os problemas que os solos e as rochas põem ao engenheiro civil e a afinidade entre os fenómenos a ter em conta, a qual se acentua com o grau de fissuração da rocha. O fenómeno específico mais importante a ter em conta no comportamento das rochas é a influência das fendas nas propriedades mecânicas. Deve notar-se que, contudo, também nos solos é por vezes necessário ter em consideração a sua fissuração.

No quadro seguinte apresentam-se ordens de grandeza das tensões de rotura à compressão de diversos solos e rochas; essas tensões foram obtidas em ensaios de prismas.

	$Kgcm^{-2}$
a) *Solos*	
Incoerentes	0
Lodos do estuário do Tejo (profundidade de 0 a 30 m) . .	0 a 0,2
Areias argilosas do terciário (Areolas de Braço de Prata) . .	0,5
Argilas basálicas	2
Argilas miocénicas (Forno do Tijolo e dos Prazeres)	4
Saibros graníticos	10
b) *Rochas*	
Cascões calcários (Entre Campos)	≈ 50
Granitos muito alterados	100
Calcários cristalinos	500
Granitos sãos	800

Este quadro mostra que o critério tomado para classificação dos materiais da crusta em solos e rochas está em geral de acordo com o critério corrente de resistência. Os solos apresentam por via de regra tensões de rotura à compressão inferiores a, digamos, 20 $kgcm^{-2}$ e as rochas superior a este valor.

Convém não deixar de notar que as definições dadas de solo e de rocha não coincidem com as da geologia.

Nesta ciência, assim como na Agronomia, designa-se por solo sòmente a parte superficial da crusta que suporta a vegetação. Tal material que, segundo a nossa definição, é em geral um solo, não tem contudo interesse para o engenheiro civil dadas as suas precárias propriedades mecânicas. Na geologia a designação de rocha é dada ao material que constitui qualquer formação independentemente das suas propriedades mecânicas, enquanto que nós definimos rocha como material que não se desagrega por agitação dentro de água.

Os solos residuais correspondem na geologia às rochas num estado de alteração muito avançado, e os solos transportados estão contidos nas rochas sedimentares da geologia, nas quais se englobam os depósitos de materiais provenientes da erosão independentemente do seu estado de agregação.

1.2 — *Generalidades sobre a estrutura e as propriedades dos solos*

Os solos, tal como foram definidos, possuem uma estrutura do tipo indicado na fig. 1. As partículas minerais ou de matéria orgânica encontram-se mergulhadas num fluido o qual é constituído, no caso mais geral, por água e ar. Os espaços entre as partículas são designados vazios independentemente de se encontrarem ou não preenchidos por água.

Como se vê na figura, o ar pode preencher completamente o espaço entre certas partículas ou encontrar-se sob a forma de bolhas.

Num solo há pois, em geral, uma fase sólida, uma fase líquida e outra gasosa.

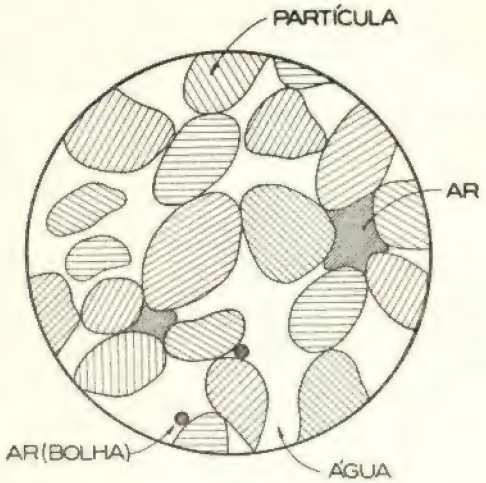


Fig. 1

E agora pergunta-se: encontra muitas vezes o engenheiro civil nos seus trabalhos solos saturados, isto é, com os vazios completamente preenchidos com água?

Na fig. 2 apresenta-se um corte de um maciço mostrando a distribuição típica das condições de humidade. Por ascensão capilar a água sobe do nível freático, isto é, do nível em que permanecerá num poço aberto no maciço, até um nível designado nível capilar. O solo não se apresenta saturado ao longo

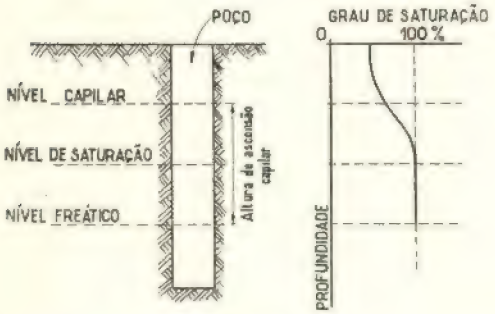


Fig. 2

de toda a altura de ascensão capilar mas sòmente até um certo nível designado nível de saturação. Na figura apresenta-se o diagrama típico da variação do grau de saturação com a profundidade.

Para solos com partículas de pequenas dimensões, como os solos argilosos, o nível de saturação pode estar situado alguns metros acima do nível freático.

As profundidades dos 3 níveis considerados dependem, entre muito largos limites, do clima da região e da natureza dos solos.

Entre nós é frequente encontrar-se o nível de saturação a pequenas profundidades, digamos da ordem dos 2 metros, donde se conclui que temos muitas vezes de ter em conta o comportamento de solos saturados.

A prática corrente de evitar fundar as obras sobre as camadas superficiais é a maior parte das vezes justificável pela conveniência de procurar apoio sobre camadas permanentemente saturadas, isto é, de evitar camadas que sofram variações sazonais de humidade que podem provocar variações de volume e portanto assentamentos.

Acerca das propriedades dos solos começaremos por afirmar que elas são extremamente complexas o que será posto em evidência no decorrer deste curso.

Em primeiro lugar as propriedades dos solos dependem da natureza química das partículas e do seu estado de superfície, e ainda das suas dimensões, forma e arranjo. Em segundo lugar essas propriedades são profundamente influenciadas pela maior ou menor quantidade de água que preenche os vazios da fase sólida, e pela natureza das substâncias que a água contém em dissolução.

Para o estudo da influência da natureza química das partículas e do seu estado de superfície, a mineralogia apoiada na química e na física tem fornecido uma valiosa contribuição. Esperamos que do progresso de tal estudo resulte o esclarecimento da natureza de muitas das propriedades dos solos com interesse para o engenheiro civil.

As dimensões das partículas dos solos variam desde, digamos, as dezenas de centímetros até às partículas coloidais com diâmetros inferiores a cerca de 2 μ (0,002 mm).

Para os solos com partículas de maiores dimensões, como os solos arenosos, o arranjo das partículas, isto é, a estrutura, é do tipo indicado na fig. 3 a. Para os solos com partículas de pequenas dimensões as estruturas

são em geral mais complexas dispondo-se os grãos de modo a deixarem vazios entre grupos de grãos tal como se vê na fig. 3 b. É o pequeníssimo peso destas partículas

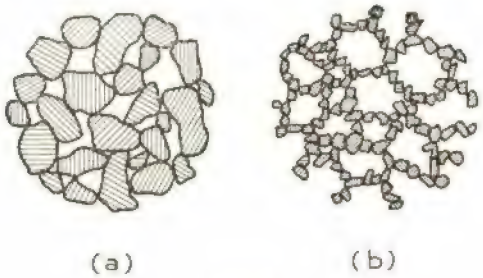


Fig. 3

que torna possível a formação destas estruturas vacuolares quando se dá a sedimentação. Na formação de tais estruturas também desempenham um papel importante certas acções eléctricas que se desenvolvem entre as partículas, acções que são muito influenciadas pela natureza dos iões presentes na água onde se processa a sedimentação.

Enquanto que nas estruturas do tipo da fig. 3a a porosidade, isto é, a relação entre o volume de vazios e o volume total do solo, varia em geral de 35 a 45 %, para as estruturas vacuolares atinge e ultrapassa valores como 80 %. Os solos de diversos pontos do país que têm sido ensaiados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil não têm revelado grande percentagem de partículas de muito pequenas dimensões, sendo por isso sòmente de 55 % o valor máximo da porosidade medido, o qual foi observado em amostras de aluviões recentes do Tejo.

A grande compressibilidade que correntemente apresentam os solos que contêm uma elevada percentagem de partículas de pequenas dimensões, tão típica das argilas, é uma consequência bem compreensível da sua elevada porosidade e do tipo de estrutura referido. Começa assim a compreender-se a importância fundamental, que será posta em evidência no decorrer do curso, da fracção fina dos solos.

Como se disse, a água desempenha um papel preponderante no comportamento dos solos. Dadas as pequenas dimensões dos vazios dos solos a água que os preenche total ou parcialmente comporta-se de maneira muito diferente da água quando observada em grandes massas, apresentando-se os fenómenos tanto mais complexos quanto menores são as dimensões desses vazios.

Apesar dos físicos e químicos, respondendo em especial às necessidades da agronomia e da indústria cerâmica, se terem profundamente interessado nas últimas décadas pelo esclarecimento da natureza destes fenómenos ainda hoje são objecto de controvérsia mesmo os seus aspectos fundamentais.

Pode considerar-se como definitivamente estabelecido, o que é fundamental para a compreensão do comportamento dos solos, que as partículas minerais exercem sobre a água na sua vizinhança uma fortíssima atracção. Esta atracção, que parece dever atribuir-se essencialmente a uma carga eléctrica negativa distribuída na superfície das partículas, determina não só uma orientação e, digamos, compactação das moléculas da água mas ainda uma chamada dos iões em dissolução na água. Isto é, a superfície das partículas minerais encontra-se revestida por uma camada de água adsorvida, quer dizer, com propriedades diferentes da água situada a maior distância.

Parece poder afirmar-se que na vizinhança imediata das partículas a água, dada a forte atracção sofrida, se comporta

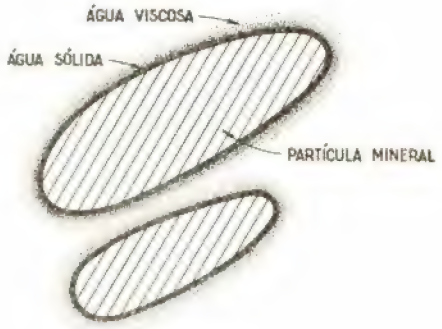


Fig. 4

como um sólido passando progressivamente a comportar-se como um líquido viscoso de viscosidade decrescente com a distância à partícula (fig. 4). A espessura da película

adsorvida varia entre largos limites com a natureza mineralógica das partículas e com as substâncias dissolvidas na água; sòmente a título de esclarecimento da ordem de grandeza da espessura dessa partícula pode referir-se o valor 0,1 μ (10^{-4} mm).

Os fenómenos de ascensão capilar, cuja interpretação ainda não é hoje satisfatória, são devidos a estas acções exercidas pela fase sólida sobre a fase fluida. Tais fenómenos serão desenvolvidamente tratados na palestra destinada ao estudo da água nos solos.

Estando as partículas dos solos separadas pela água, a sua coesão, isto é, a capacidade dos solos resistirem a esforços de tracção, só se pode explicar, ou por uma atracção directa entre as partículas, a qual não é hoje admitida, pelo menos como fenómeno essencial, ou então admitindo que a água adsorvida tem capacidade para resistir a tais esforços. Deste modo se compreende a importância da consideração da água no estudo da coesão dos solos.

A coesão é maior nos solos com mais elevada dosagem de partículas de pequenas dimensões pelo facto de neles ser maior a dosagem de água adsorvida pois ela aumenta com a superfície específica da fase sólida.

A plasticidade dos solos, propriedade com algum parentesco com a coesão, também depende directamente da existência da água. Tal dependência é bem ilustrada pelo facto do material obtido amassando as partículas de um solo argiloso com outros líquidos como, por exemplo, o petróleo não se apresentar com qualquer plasticidade.

As propriedades eléctricas dos solos, em particular as postas em jogo na electro-osmose, que hoje se começa a usar na consolidação de maciços, dependem também essencialmente da água, em particular dos iões nela contidos.

Os fenómenos tão comuns e importantes que acompanham a secagem e humidificação dos solos são outra manifestação do papel essencial desempenhado pela fase fluida.

A fase fluida desempenha uma função primordial na deformação dos maciços pois tal deformação é condicionada pelo escoamento dessa fase através da fase sólida. Adiante teremos oportunidade de considerar este condicionamento com algum pormenor.

Após a breve referência que acabamos de fazer àcerca da estrutura dos solos está-se em posição de compreender o significado da definição do solo que foi apresentada. Os agregados de partículas minerais que se separam quando agitados com água são aqueles em que o aglutinante é a água: ao juntar-se água a um tal agregado a espessura das películas que separam as partículas aumenta a ponto de desaparecer o contacto por intermédio da água adsorvida e portanto a coesão.

Conclui-se pois que, com a definição dada, se pretendeu excluir da designação de solo os materiais constituídos por partículas agregadas com ligações sólidas como as resultantes da interposição de um cimento calcário ou silicioso. Tal é justificável pelo facto dos agregados de partículas com este tipo de ligações apresentarem por via de regra propriedades muito diversas das observadas quando a agregação é realizada pela água.

Em resumo, as propriedades dos solos dependem de:

— natureza química das partículas
— estado de superfície das partículas
— forma das partículas
— granulometria
— porosidade
— grau de saturação
— substâncias dissolvidas na água

Os parâmetros que determinam as propriedades dos solos e dos betões são análogos, residindo a principal diferença no aglutinante que nos solos é a água, facto que está na origem da maior complexidade das propriedades dos solos.

Como factor que concorre para a complexidade das propriedades dos solos não deve deixar de ser referido o seu envelhecimento provocado pelos agentes atmosféricos, o qual é por via de regra muito mais acentuado do que nos outros materiais de cons-

trução. Nos problemas que envolvem solos superficiais pode dizer-se que é sempre necessário ter esse envelhecimento em consideração.

Além da complexidade das propriedades de um dado solo, observa-se que elas variam extraordinàriamente de solo para solo por vezes mesmo entre solos de composição muito análoga.

Actualmente impõe-se buscar uma mais completa compreensão das propriedades dos solos para o que será indispensável prosseguir os estudos sobre a estrutura das partículas minerais e da água dos solos.

Antes de se concluir a breve referência que temos vindo a fazer às propriedades dos solos não queremos deixar de citar o desenvolvimento que estão tomando os métodos de modificação dessas propriedades à custa da adição de agentes químicos, quer por mistura quer por injecção, e à custa da electro-osmose. Esboça-se assim uma nova concepção na resolução dos problemas postos pelos solos ao engenheiro civil: em vez de se adaptar a obra à natureza dos solos adaptam-se os solos à obra, modificando-lhe as suas propriedades.

1.3 — *Heterogeneidade e anisotropia dos solos*

Além da complexidade das propriedades dos solos, o estudo do comportamento dos maciços encontra uma outra dificuldade que classificaremos ainda de mais grave do ponto de vista do engenheiro civil: a heterogeneidade e a anisotropia dos maciços.

Esta heterogeneidade está directamente ligada à extrema lentidão com que normalmente se processa a formação dos solos, em particular dos solos que mais interessam no nosso País os quais resultam da deposição na água de produtos de erosão. Esta lentidão é tal que as espessuras de solo que temos de considerar nos nossos problemas, mesmo que sejam de poucos metros, levaram muitas vezes milénios a constituir-se, tempo ao longo do qual houve largas possibilidades de variação da natureza das formações erodidas, e da modificação das condições de transporte e de deposição. Da variação destes parâmetros resulta uma diferenciação em camadas, os estratos, cuja regularidade de composição e de espessura é maior nas grandes bacias de deposição, como os fundos marítimos, e menor, como é óbvio, nas pequenas bacias continentais.

Na fig. 5 estão indicados cortes típicos em solos de formação marítima e continental. Na parte superior representam-se os terrenos de fundação do novo matadouro municipal de Lisboa e na parte inferior os da futura piscina municipal, no Campo Grande. É bem patente a maior regularidade das formações marítimas e o aspecto lenticular que frequentemente apresentam as formações continentais.

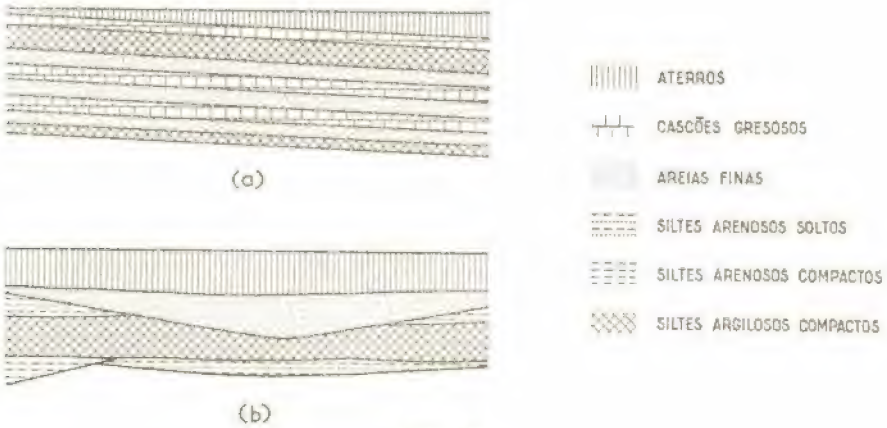


Fig 5

Para a heterogeneidade dos solos concorrem ainda muitos outros factores, como: movimentos da crusta que provocam deformações, roturas e esmagamento dos solos, circulação de água na massa dos solos, que pode provocar erosões ou deposições de substâncias em dissolução na água, exposição ao ar durante certos períodos da formação de solos por deposição na água, o que acarreta a sua secagem e a erosão por agentes atmosféricos, etc.

É oportuno acentuar que por via de regra as propriedades mecânicas dos solos melhoram com a profundidade mas que tal está longe de ser regra geral. É frequente cometer-se o erro de ir fundar em camadas acima das quais há outras com melhores propriedades.

Além da heterogeneidade os solos apresentam muitas vezes propriedades anisotrópicas como consequência do processo de formação, podendo observar-se diferenças radicais entre as propriedades nas diversas direcções.

Da grande heterogeneidade dos maciços naturais resulta que mesmo os maciços artificiais, como aterros e barragens de terra, também apresentam uma acentuada heterogeneidade, pois não é geralmente económico levar muito longe a selecção dos materiais de que se dispõe, entre os quais se tem mesmo a maior parte das vezes de incluir os produtos provenientes da abertura das fundações da obra. Os processos usados na execução dos maciços artificiais concorrem ainda para lhes conferir uma certa anisotropia.

Deste modo os solos estão longe de apresentar o grau de homogeneidade que possuem os materiais de construção correntes fabricados pelo homem.

A título de indicação de ordens de grandeza apresentam-se na fig. 6 algumas curvas de dispersão de propriedades. No eixo das abcissas marcaram-se os valores dos cocientes das tensões de rotura observadas numa série de ensaios pelo valor médio dessas tensões de rotura; em ordenadas marcou-se a percentagem de valores que cai em cada intervalo de grandeza 0,1 do eixo das abcissas. Os valores relativos ao aço de construção referem-se a ensaios de tracção conduzidos sobre provetes das mais diversas procedências e os do betão referem-se a ensaios de compressão de cubos realizados para controle do betão da barragem

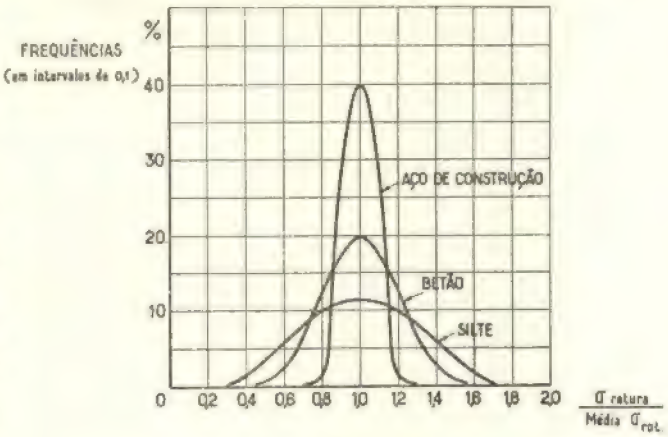


Fig. 6

de Castelo do Bode. Os valores relativos ao silte foram obtidos no ensaio das camadas muito homogéneas de siltes terciários das fundações do Matadouro Municipal (fig. 5 a).

Como se vê, apesar dos resultados do ensaio do silte se referirem a uma camada de homogeneidade excepcional, encontraram-se para ele valores variando entre cerca de 0,3 e 1,8 da tensão média de rotura, enquanto que os ensaios de aços de construção provenientes das mais diversas origens conduziram a valores oscilando sòmente entre cerca de 0,7 e 1,3 da tensão média. Para o betão os valores observados variam entre cerca de 0,5 e 1,5 da tensão média.

A heterogeneidade e a anisotropia dos maciços levanta à Mecânica dos Solos, por um lado, a grande dificuldade de as ter em consideração, mas, por outro lado, e é este o caso mais comum, simplificam-lhe notàvelmente a sua tarefa. De facto, só quando a heterogeneidade e a anisotropia são regulares terá sentido procurar considerá-las, complicando-se então extraordinàriamente os problemas. Mas o que se observa, digamos sempre, é uma heterogeneidade errática, quer em profundidade quer em superfície, heterogeneidade que só poderia ser conhecida com algum rigor à custa de uma

sondagem e amostragem com desenvolvimento incomportável quanto a prazo de execução e custo. Assim, por exemplo, no caso da curva da fig. 6, que se refere a um silte de constituição muito regular as dispersões que ela mostra observaram-se mesmo em pontos situados a distâncias inferiores ao metro.

A heterogeneidade errática conduz afinal a só ter sentido atribuir uma pequena precisão às grandezas que definem as propriedades dos solos a considerar num dado problema. Daqui resulta directamente ter pouco interesse exigir que a Mecânica dos Solos desenvolva teorias muito elaboradas, pois os resultados da aplicação dessas teorias virão sempre eivados dos erros provenientes da indeterminação do conhecimento dos dados dos problemas. Conclui-se pois, e queríamos frizá-lo, que a heterogeneidade dos solos não justifica, salvo casos excepcionais, a preocupação de dispor de teorias que permitam prever com elevada precisão o comportamento de maciços; exige sim que se procure para cada caso adquirir um conhecimento minucioso das propriedades dos solos, levado até um grau proporcionado à importância da obra.

1.4 — *Prospecção dos solos. Papel da geologia*

A grande diversidade das formações naturais e a sua heterogeneidade e acidentes impõem, ao contrário do que acontece para materiais como o aço e o betão, que seja feito, mesmo para obras modestas o reconhecimento das propriedades dos solos interessados.

É o conjunto das operações destinadas a este reconhecimento que se designa por prospecção, a qual será desenvolvidamente tratada numa das lições deste curso.

Dada a complexidade das formações naturais é em geral indispensável que na prospecção dos solos colabore um geólogo cujo papel é indicar as grandes linhas da estrutura do solo, tais como disposição, espessura e consistência de camadas, circulação de água, acidentes, etc.

É a partir destas indicações que se pode proceder ao estabelecimento de um plano de determinação quantitativa das propriedades dos solos que conduza a resultados significativos dentro da preocupação de diminuir as despesas com a prospecção e também a sua duração.

A formação mais conveniente do geólogo que deve colaborar nos trabalhos de prospecção não é a clássica, do tipo naturalista, mas sim a formação baseada na física e na química.

A contribuição do geólogo só é dispensável quando se trata de obras de pequeno vulto ou então quando se trabalha em regiões, como centros urbanos, nas quais exista um largo conhecimento das características gerais dos solos.

Mesmo quando conhecida a geologia de um local é ainda muitas vezes excessivo, dada a heterogeneidade dos solos, o número de amostras a colher para determinação das propriedades que interessa conhecer.

É por isso hoje técnica corrente fazer ao longo de cada furo a determinação a pequenos espaços, por exemplo de meio a meio metro, de uma propriedade de medição expedita, como a resistência à penetração de uma ponta ou a humidade, estabelecendo depois, à custa de um pequeno número de amostras colhidas nas condições

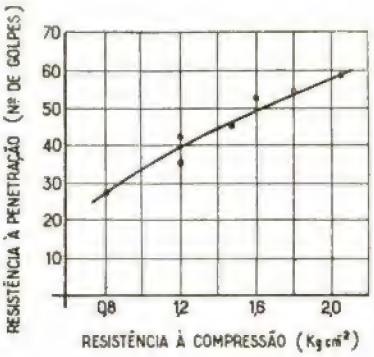


Fig. 7

devidas, a correlação entre essa propriedade e as outras de determinação mais complexa e demorada. Na fig. 7 apresenta-se uma curva de correlação entre a resistência à penetração com a sonda normal ame-

ricana (1) e a resistência à compressão simples. A curva, obtida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, diz respeito a siltes, mostrando os pontos obtidos que a correlação é bastante apertada.

Deste modo se obtém economias que podem mesmo permitir aumentar o número de furos e assim alcançar uma visão mais clara das propriedades do solo.

Nos últimos anos o desenvolvimento de métodos de ensaio de solos «in situ», isto é, sem extracção de amostras, visou não só, como se acaba de referir, a obtenção expedita de valores em grande número de pontos mas também evitar as perturbações provocadas nos solos, quer pelas operações de extracção de amostras quer pelo facto do estado de tensão do solo sofrer uma alteração. O desenvolvimento de métodos de ensaio «in situ» afigura-se-nos por estas razões com grande interesse.

Em particular tenta-se actualmente o desenvolvimento de métodos de determinação de propriedades mecânicas a partir da medição de velocidades de propagação de ondas, e a determinação de densidades e humidades «in situ» respectivamente a partir da difusão de raios γ e de neutrões. Estes dois últimos métodos estão sendo tentados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

2. A mecânica dos solos

2.1 — *Previsão do comportamento dos maciços*

Os solos levantam ao engenheiro civil problemas de natureza muito diversa. Podemos agrupá-los nas categorias indicadas no quadro seguinte onde também se incluiram os trabalhos em que esses problemas ocorrem com maior frequência e importância. Constata-se que em todos os sectores da engenharia civil é importante a consideração dos solos.

Para resolver os problemas postos pelos solos, tal como acontece em todos os domínios da actividade humana, o engenheiro civil recorre em primeiro lugar ao conhecimento que chega até ele da maneira como foram resolvidos problemas análogos. Assim acontece num problema de movimento de terras quando pretende escolher as ferramentas e dispor o estaleiro, num problema de fundações, ao considerar certa gama de soluções, na selecção de materiais para uma barragem de terra, etc.

Problemas	Trabalhos
Movimento de terras	Urbanização Estradas e aeródromos Barragens de terra . . . . .
Estabilização de solos	Estradas e aeródromos Barragens de terra . . . . .
Fundações	Edifícios Pontes Obras portuárias Barragens . . . . .
Suporte de maciços	Obras portuárias Túneis Canais Estradas . . . . .
Resistência de taludes	Estradas Canais Barragens de terra . . . . .
Erosão	Aproveitamentos hidráulicos Estradas (protecção de taludes) . . . . .
Drenagem	Estradas e aeródromos Barragens de terra Edifícios . . . . .

É neste fundo constituído pelo conhecimento das soluções anteriormente adoptadas em casos análogos que o engenheiro escolhe os tipos de solução, tendo contudo, por outro lado, sempre necessidade de adaptar essas soluções ao problema em estudo, pois pode bem dizer-se que uma obra a realizar constitui sempre um novo problema. De facto, nunca há repetição de condições anteriormente verificadas, quer quanto à finalidade a atingir com a obra, quer quanto às con-

(1) Terzaghi, Peck, «Soil Mechanics in Engineering Practice», John Wiley and Sons, 1948, pág. 265.

dições de local e de momento, tais como sujeições topográficas, materiais disponíveis em condições económicas, transportes, mão de obra, etc.

Dum modo geral, ao abordar-se um problema apresentam-se como possíveis diversas soluções cujo valor é necessário julgar. Este julgamento incide, em esquema, sobre dois aspectos:

—previsão do comportamento em serviço dessas soluções, tendo em vista a satisfação da finalidade que se pretende atingir.
—exequibilidade, tendo em consideração os meios à disposição, a economia e o prazo de execução.

Consideremos sòmente o primeiro aspecto: a previsão do comportamento.

Para esta previsão, que implica a consideração de fenómenos da mais variada natureza, o engenheiro apoia-se:

—na sua experiência pessoal, a experiência vivida, e, sobretudo, na sua intuição, a experiência da espécie humana.
—em informações contidas na bibliografia àcerca do comportamento de obras análogas, implicando, como é óbvio, a classificação de obras como análogas já um julgamento pessoal.
—em teorias quantitativas, a forma mais evoluída do conhecimento, as quais permitem, uma vez definidos certos parâmetros, como formas, propriedades dos materiais, acções exteriores, etc., prever o comportamento que apresentará uma dada solução.

O valor da contribuição das teorias varia muito de domínio para domínio, mas, mesmo nos domínios mais teorizados, é fundamental e constante a necessidade de julgamento pessoal.

Vemos por isso a actividade do engenheiro como uma arte e não com uma ciência.

—finalmente, a previsão do comportamento pode fazer-se a partir da observação de modelos, isto é, de sistemas cuja evolução se pode relacionar, por intermédio de relações chamadas de semelhança, com a que sofrerá o protótipo.

Nos problemas relativos aos maciços, assim como em todos os problemas do engenheiro civil, um dos aspectos essenciais do comportamento cuja previsão se impõe é a determinação das deformações que sofrerá a obra em serviço, em particular a averiguação da possibilidade de se darem roturas. De facto, a permanência das formas é fundamental pois uma obra consiste afinal na disposição de dados materiais de modo a obter-se certas formas impostas pela função que ela tem de desempenhar.

Além da permanência das formas a previsão do comportamento das obras tem de incidir sobre muitos outros aspectos, tais como alteração química dos materiais em serviço, propriedades das superfícies expostas, como atrito, desgaste e aspecto, propriedades acústicas e térmicas, fundamentais nos edifícios, percolação de água, essencial nas barragens, etc., etc.

São de natureza muito diversa as causas que provocam deformações, incluindo nestas as roturas. Podem ser forças, variações de humidade, alterações químicas, etc. Designamos genèricamente por solicitação qualquer causa de deformação, excluída a alteração química.

2.2 — *Solicitações a considerar*

No caso dos problemas relativos aos solos as solicitações que, dum modo geral, interessa considerar são as seguintes:

—forças aplicadas na superfície dos maciços, quer estáticas, como as descarregadas pela maior parte das fundações, quer dinâmicas como as exercidas por um veículo sobre um pavimento, por uma estaca durante a cravação, etc.
—peso próprio dos maciços o qual é necessário ter em conta na maior parte dos problemas, dados os grandes volumes de solo geralmente interessados.
—variações de temperatura. Têm reduzido interesse entre nós pois que, dado

o pequeno valor do coeficiente de dilatação linear dos solos em face da sua grande deformabilidade, as variações de temperatura só são de considerar quando provocam a congelação de água que preenche os vazios donde resulta uma expansão que tantos danos provoca nas estradas dos países frios.

—impulsão sofrida pela fase sólida quando situada abaixo do nível freático.

—forças de percolação, isto é, as forças exercidas sobre a fase sólida em virtude do escoamente da fase líquida. Estas forças são as responsáveis de numerosos escorregamentos do paramento de montante de barragens de terra ocorridos quando de descidas bruscas da água das albufeiras; de facto, a drenagem da água contida nos vazios da barragem exerce sobre o esqueleto sólido uma pressão que pode ser suficiente para determinar tal escorregamento.

—forças devidas aos fenómenos capilares. A ter em conta, por exemplo, no comportamento de maciços nos quais a altura de ascensão capilar é importante, nos fenómenos que acompanham a secagem de maciços, etc. É ainda precário o conhecimento das características destas forças.

Como se vê, são muito diversas as causas de deformação e rotura dos solos. Podem agrupar-se em: forças exteriores, nas quais se incluem as forças de superfície e o peso próprio, variações de temperatura, e, finalmente, forças interiores resultantes da inter acção entre a fase sólida e a fase fluida, as quais compreendem forças de impulsão, forças de percolação e forças capilares.

2.3 — *A Mecânica dos Solos*

A Mecânica dos Solos é o capítulo da Mecânica que procura prever as deformações, incluídas as roturas, de maciços submetidos à acção de quaisquer solicitações. Para atingir este fim a Mecânica dos Solos apoia-se sobretudo na Mecânica dos Sólidos e dos Fluidos.

A Mecânica dos Solos não se ocupa, em rigor, do estudo das propriedades dos solos, anàlogamente ao que acontece com os outros materiais cujas propriedades e condições de resistência não são estudadas na mesma disciplina. No entanto é hoje costume apresentar sob a designação de Mecânica dos Solos também o estudo das propriedades dos solos, o que é aconselhável na fase actual do conhecimento.

A Mecânica dos Solos não trata numerosos problemas do engenheiro civil relativos aos solos, como os respeitantes ao equipamento para trabalhos com os solos, aos métodos de construção, etc. O termo Geotecnia, que é por vezes usado como sinónimo de Mecânica dos Solos, prestava-se bem para designar a disciplina do engenheiro civil tratando na generalidade os problemas relativos aos solos e às rochas.

Tal como a definimos, a Mecânica dos Solos ocupa pois em relação aos solos uma posição inteiramente anàloga à da Resistência de Materiais em relação aos outros materiais de construção.

Em face da Resistência de Materiais a Mecânica dos Solos luta com duas grandes dificuldades: a maior complexidade das propriedades dos solos e a heterogeneidade dos maciços. Além disso, no estudo do comportamento de um maciço é necessário ter em consideração a evolução interdependente das fases sólida e fluida.

É agora oportuno levantar algumas questões. Será legítimo considerar a Mecânica dos Solos como um novo capítulo da Mecânica? Quando se deu a sua constituição? Qual o estado dos conhecimentos à data desta constituição?

Vamos para isso apresentar um breve esboço da evolução dos conhecimentos sobre os solos que interessam ao engenheiro civil.

3. Evolução histórica da Mecânica dos Solos

3.1 — *Trabalhos de Coulomb e Rankine: sua repercussão*

No seu esforço para melhorar as condições de vida, o homem tem tido desde a mais remota antiguidade necessidade de trabalhar com os solos. Bastará recordar

as habitações lacustres do homem neolítico, cujas fundações sobre estacas puzeram certamente problemas delicados aos nossos antepassados, a construção de canais e de barragens para rega das civilizações da Mesopotâmia e do Egipto, etc.

Apesar deste contacto multimilenário com os solos o conhecimento do seu comportamento é, pode bem dizer-se, de hoje, sendo o atrazo certamente devido à complexidade das suas propriedades e à sua heterogeneidade. Como sucede sempre enquanto as leis de um dado domínio não estão estabelecidas, os solos têm sido considerados por muitos espíritos como materiais insusceptíveis de serem submetidos a leis, encarando-se com fatalismo os fenómenos que se observam, em especial quando há acidentes.

O estabelecimento das leis da Mecânica nos meados do século XVII abriu a possibilidade do estudo quantitativo do comportamento dos solos.

Mas foi só em 1773 que Coulomb, coroando a actividade que durante cerca de 50 anos foi desenvolvida por diversos cientistas, estabeleceu uma primeira teoria de previsão do comportamento de maciços, a conhecida teoria do impulso dos solos sobre suportes laterais.

Esta teoria, estabelecida sòmente para os solos incoerentes, tem, apesar de se apoiar em hipóteses extremamente simplificadoras, desempenhado um papel central nos desenvolvimentos dos estudos dos maciços. Esta situação da teoria de Coulomb é consequência, em primeiro lugar, de essa teoria fornecer em certas condições o valor dos impulsos com precisão inteiramente satisfatória e, em segundo lugar, resulta do facto das tentativas feitas para o seu aperfeiçoamento e generalização terem conduzido a serem postos em evidência muitos dos fenómenos fundamentais a ter em conta no estudo do comportamento dos maciços.

A grande complexidade dos fenómenos em jogo no estudo dos impulsos sobre suportes laterais não permite ainda uma resolução satisfatória deste problema, não havendo, apesar do labor de numerosos investigadores, muito mais a que lançar a mão do que à teoria de Coulomb: o que hoje se conhecem são as condições da sua validade, isto é, as suas limitações, as quais contudo ainda estão pouco divulgadas.

Foi sòmente quase um século depois do trabalho de Coulomb que apareceu, em 1856, outro trabalho sobre o comportamento de maciços digno de nota: a memória de Rankine sobre o equilíbrio de um maciço semi-indefinido. Este trabalho serviu de modelo aos numerosos estudos que se lhe seguiram sobre comportamento dos sólidos, em especial dos solos, submetidos a deformações plásticas, quando se admite a hipótese de que os fenómenos só dependem da consideração de dois parâmetros característicos do material: o ângulo de atrito interno e a coesão.

Entre os estudos feitos nesta direcção, levados a cabo sobretudo em França, merecem especial relevo os de Resal, no princípio deste século, e mais recentemente os de Frontard. A obra de Caquot «Équilibre des massifs à frottement interne, stabilité des terres pulvérulentes ou cohérentes» editada em 1934, apresenta desenvolvidamente os notáveis resultados alcançados e a orientação que seguiu essa escola.

Ela desenvolveu um grande esforço para vencer as dificuldades analíticas postas pela resolução dos problemas de equilíbrio dos maciços, dentro das hipóteses referidas, mas não se preocupou em esclarecer os fenómenos que efectivamente se passam na natureza: pode dizer-se que foi uma escola de matemáticos e não de físicos. De facto, não procuraram desenvolver os conhecimentos das propriedades dos solos nem interpretar os complexos fenómenos que todos os dias aparecem nos trabalhos com estes materiais.

3.2 — *Grandes acidentes do fim do século XIX e princípios do século actual*

Para a execução das grandes obras de engenharia do fim do século passado e do início deste século o conhecimento que o homem possuía do comportamento dos solos era francamente insuficiente o que originou numerosos acidentes de grande vulto.

E mais uma vez se verificou que as necessidades do homem estão na base do desenvolvimento dos seus conhecimentos, pois foram esses revezes que trouxeram um vasto movimento que culminou com a criação da Mecânica dos Solos.

Nos Estados Unidos, os sucessivos escorregamentos dos taludes do canal de Panamá, os quais mobilizaram volumes de solo da ordem de 40.000.000 m^3, as roturas de várias dezenas de barragens de terra, e os assentamentos de edifícios importantes levaram a American Society of Civil Engineers a nomear em 1913 uma comissão, presidida por R. A. Cummings, encarregada de esclarecer a situação. Uma das conclusões mais importantes a que chegou esta comissão foi ter reconhecido a necessidade de exprimir quantitativamente as propriedades dos solos a fim de poder ser tirado um proveito geral da experiência colhida num dado trabalho. Estabeleceu ainda uma classificação dos solos, baseado em determinações quantitativas, e frizou a importância das partículas coloidais nas propriedades dos solos.

Na Suécia as investigações sobre os solos foram também escorvadas por uma série de escorregamentos catastróficos de taludes dos caminhos de ferro. Para investigar os fenómenos ocorridos e propor as medidas a tentar para os taludes existentes foi nomeada em 1913 uma comissão presidida pelo professor Fellenius. Entretanto deu-se neste país, em 1916, o conhecido escorregamento de Göteborg: um muro cais deslocou-se de 5 m para o lado do mar, notando-se a cerca de 90 m de distância um levantamento do fundo de alguns metros.

Ao problema do comportamento dos taludes tinha até então sido dada pequena importância apesar dos acidentes de todas as épocas. Os estudos de Resal sobre o comportamento de maciços levaram-no a estabelecer uma teoria sobre a resistência de taludes que não era contudo aplicada.

Seguia-se sòmente a regra de dar aos taludes uma inclinação inferior ao chamado ângulo de repouso o qual era indicado em tabelas. Admitia-se pois que a inclinação a dar a um talude não dependia da sua altura apesar do facto, que certamente a ninguém passava despercebido, dos solos coesivos poderem manter com um talude vertical até uma altura que depende da natureza do solo.

O relatório da comissão sueca, publicado em 1922, marca um avanço decisivo no estudo do comportamento dos taludes. O fruto mais notável da actividade dessa comissão foi o desenvolvimento do conhecido método sueco de determinação da resistência de taludes no qual é retomada a ideia de Coulomb da consideração à priori de uma dada superfície de escorregamento. O método sueco, que tem sido objecto de numerosos estudos e verificações, é hoje uma das ferramentas mais frequentemente usadas por quem tem de lidar com os solos.

Assim como aconteceu nos Estados Unidos e na Suécia, também na Alemanha diversos acidentes ocorridos na mesma época, em especial na construção do canal de Kiel e de diversos muros cais, chamaram a atenção para o estudo do comportamento dos solos. Neste país os estudos mais importantes foram levados a cabo por Krey que se ocupou especialmente do estudo de suportes laterais, em particular ancorados, e do estudo da resistência ao corte dos solos.

Em quase todos os países eram também importantes os prejuízos devidos a assentamentos de grandes edifícios. Para tal concorria o facto do dimensionamento das funções ser feito a partir do conceito de carga admissível, a qual era fixada por reconhecimento visual ou por ensaios de carga.

Esta noção de carga admissível estava vinculada ao terreno sobre o qual descarregava directamente a fundação, não se procurando ter em consideração a natureza das camadas mais profundas. Essa noção conduzia a supor-se que uma superfície carregada uniformemente assentava igualmente em todos os pontos.

Hoje dimensionam-se as fundações a partir da consideração do estado de tensão que a fundação desenvolve em profundidade no maciço em que se apoia.

3.3 — *Nova orientação dos estudos dos solos: contribuição de Terzaghi*

O ano de 1913 marca uma viragem nos estudos do comportamento dos solos que desde então têm tido um desenvolvimento sempre crescente, sobretudo a partir de 1925, data em que Terzaghi publicou a obra «Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage», título que se pode traduzir por «Mecânica das construções de terra baseada na física dos solos». É com esta obra, na qual é posta em evidência o papel desempenhado pela água que preenche os vazios no comportamento dos solos, que nasce a Mecânica dos Solos, isto é, a mecânica dos sistemas constituídos por uma fase sólida granular e uma fase fluida.

Posto que a Mecânica dos Solos, tal como acontece com todos os domínios do conhecimento, seja o fruto do labor de muitas gerações de estudiosos cujas contribuições se entrelaçam, não há dúvida de que Terzaghi ocupa na nova ciência uma posição de destaque que raramente é atingida.

E agora pergunta-se: teria sòmente tido há cerca de 25 anos uma nova designação — a de Mecânica dos Solos — a teoria em evolução sobre o comportamento dos maciços ou corresponderá a criação de essa designação a uma nova orientação? A orientação é de facto nova.

Efectivamente a Mecânica dos Solos marca uma nova atitude na maneira de encarar os problemas dos maciços cujo traço característico é a preocupação de ter em conta a complexidade, que todos os dias constatamos, do comportamento dos solos. Abandona os esquemas, que as exigências práticas tinham revelado excessivamente simplificados, até então adoptados nos estudos do comportamento dos maciços.

Até então as propriedades dos solos descreviam-se em poucas linhas enquanto que hoje o seu tratamento, mesmo sumário, ocupa grande parte de um tratado de Mecânica dos Solos.

Como consequência da nova orientação reconhece-se o papel fundamental representado pela água que preenche os vazios a qual tem, pode bem dizer-se, sempre de ser tida em conta, quantitativa ou qualitativamente, quer nas propriedades dos solos, em especial na sua resistência ao corte, quer no comportamento dos maciços. É descoberto o fenómeno da consolidação por expulsão de água dos vazios e tornada possível em muitos casos a previsão de assentamentos. São postos em evidência muitos outros fenómenos, como a influência do remeximento e da tixotropia sobre as propriedades mecânicas dos solos coerentes, a influência da densidade sobre as propriedades mecânicas das areias, em especial sobre o ângulo de atrito interno, o papel desempenhado pela deformabilidade dos suportes no valor dos impulsos, a influência da repetição das cargas sobre as deformações, etc.

A Mecânica dos Solos levou-nos a reflectir sobre todos os problemas dos solos vendo sempre neles uma fase sólida e uma fase fluida.

Finalmente, ainda acerca da legitimidade em falar da Mecânica dos Solos como uma nova ciência, deve apresentar-se como argumento o extraordinário aumento de volume de conhecimentos que a fecundidade da nova orientação permitiu alcançar.

Como passos importantes dentro da evolução da Mecânica dos Solos, devem citar-se os dois Congressos Internacionais de Mecânica dos Solos e de Engenharia de Fundações, o de 1936 em Cambridge, E. U. A., e o de 1948, em Roterdão, especialmente o primeiro onde, no dizer de Terzaghi, foi oficialmente baptizada a Mecânica dos Solos. É ainda digna de nota a «Purdue Conference on Soil Mechanics», em 1940, na qual foi desenvolvidamente estudado o problema do ensino da Mecânica dos Solos nas escolas de engenharia.

Culminando o seu intenso e fecundo labor publicou Terzaghi em 1943 a obra «Theoretical Soil Mechanics» e em 1948, em colaboração com R. Peck, a obra «Soil Mechanics in Engineering Practice». Estas obras, já traduzidas em várias línguas, constituem passos fundamentais na sistematização dos conhecimentos da Mecânica dos Solos. São instrumen-

tos indispensáveis para quem tenha de se ocupar dos problemas postos pelos solos.

4. Resolução dos problemas da Mecânica dos Solos

4.1 — *Aspecto geral dos fenómenos*

Vamos procurar dar uma vista geral sobre os conceitos fundamentais da Mecânica dos Solos, o quadro de hipótese em que se desenvolve e as vias típicas que segue na resolução dos seus problemas.

A Mecânica dos Solos trilha um caminho análogo ao da Resistência de Materiais, isto é, procura prever o comportamento dos maciços a partir de teorias que se apoiam no conhecimento das propriedades mecânicas dos solos e das solicitações actuantes.

Com o fim de procurar esclarecer o aspecto geral dos fenómenos que são estudados pela Mecânica dos Solos, consideremos o caso de uma sapata que descarrega uma força P sobre um maciço limitado por uma superfície plana AB (fig. 8).

Em virtude da aplicação da força P tende a dar-se uma diminuição de volume do solo na vizinhança da sapata, isto é, uma aproximação das partículas sólidas, dizendo-se que o solo sofre consolidação.

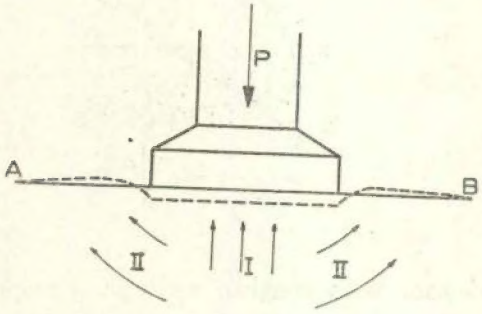


Fig. 8

Ora esta consolidação dá-se, como é evidente, à custa da expulsão da fase fluida que preenche os vazios do solo. É um fenómeno inteiramente análogo ao que se passa quando se comprime uma esponja cheia de água.

Compreende-se pois que as deformações do solo, isto é, da sua fase sólida, vão depender da maneira como se der o escoamento da fase fluida através do solo, em especial das condições de escoamento através da superfície AB do macico. Assim, se a sepata for permeável, a fase fluida pode sair do solo através dela tal como está indicado em I, enquanto que se for impermeável a fase fluida é obrigada a percorrer um caminho do tipo indicado em II. Claro que em qualquer dos casos a velocidade do escoamento da fase fluida, e portanto o ritmo dos assentamentos da sapata, serão tanto maiores quanto mais elevado for o coeficiente de permeabilidade do solo.

Supondo o solo saturado e que não se podia dar a saída da água pela superfície do maciço considerado, em virtude, por exemplo, de sobre ele jazer uma camada impermeável, então o maciço só poderia sofrer deformações a volume total constante uma vez supostas incompressíveis, como é corrente, as partículas sólidas e a água. A superfície do maciço poderia então tomar a configuração representada a traço interrompido devendo haver compensação entre os volumes correspondentes ao assentamento sob a sapata e à elevação em torno dela.

Vê-se pois claramente a interdepêndencia que existe entre as deformações da fase sólida e o escoamento da fase fluida, fenómeno de importância fundamental na Mecânica dos Solos.

A finalidade a atingir pela Mecânica dos Solos, como foi referido anteriormente, é a previsão das deformações, incluídas as roturas, sofridas pelas maciços. Tal como na Resistência de Materiais essa previsão é feita a partir da noção de tensão.

Vejamos pois quais os aspectos que toma esta noção na Mecânica dos Solos.

4.2 — *Noções de tensão total, neutra e efectiva*

Consideremos ainda uma sapata à qual se aplica uma força P (fig. 9). Como resultado da aplicação desta força uma das partes do maciço exercerá sobre a outra, através de um elemento de superfície de área ΔS, uma força ΔF.

Analisemos em que consiste ΔF tendo em conta a estrutura do solo (fig. 10 a), o qual supomos saturado. Ao aplicar-se a

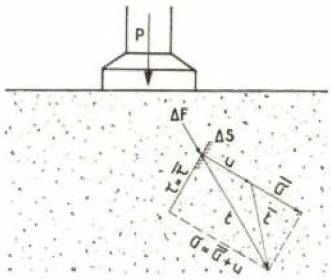


Fig. 9

força P ela transmite-se de grão a grão, como está esquematizado na figura, e a água que preenche os vazios ficará submetida a uma pressão, em geral variável de ponto para ponto do maciço, a qual designamos por tensão neutra e representamos por u. A força ΔF é o somatório das forças ΔF_g exercidas através das partículas interceptadas por ΔS, e das forças ΔF_l, normais

Para valores de ΔS de um certo intervalo AB a força ΔF exercida através ΔS é proporcional à área ΔS, isto é $\frac{\Delta F}{\Delta S}$ é constante. É este cociente constante que se designa tensão total através de ΔS, a qual representamos por t

$$t = \frac{\Delta F}{\Delta S}$$

a direcção de t é a de ΔF.

Quando as dimensões de ΔS diminuem e tomam valores da ordem das dimensões das partículas, deixa de haver proporcionalidade entre ΔF e ΔS observando-se uma variação caótica de $\frac{\Delta F}{\Delta S}$ pois o estado de tensão é extremamente variável de partícula para partícula. O mesmo acontece para qualquer outro meio, sólido ou fluido, quando as dimensões de ΔS são da ordem das dimensões dos elementos da estrutura do corpo, quer se trate de cristais, de moléculas, de iões, etc.

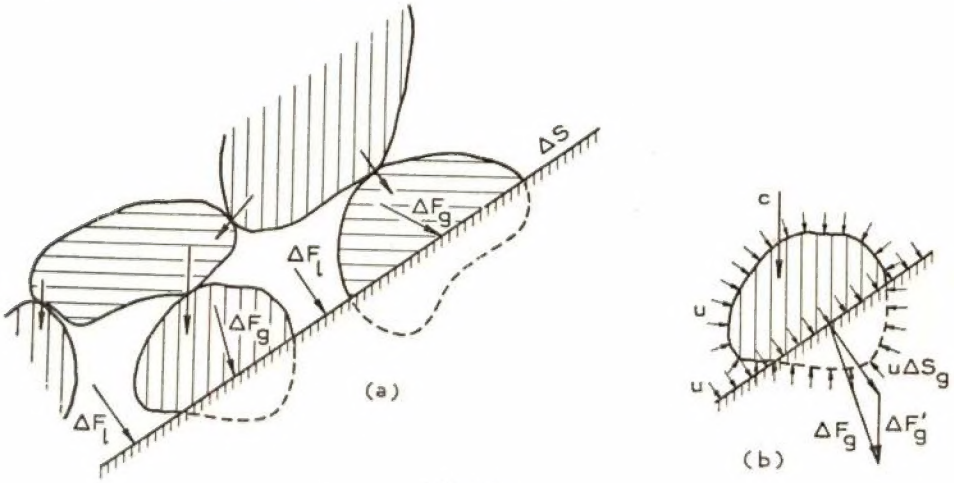


Fig. 10

a ΔS, resultantes da pressão a que fica submetida a água dos poros:

$$\Delta F = \Sigma \Delta F_g + \Sigma \Delta F_l$$

dividindo por ΔS

$$\frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{\Sigma \Delta F_g}{\Delta S} + \frac{\Sigma \Delta F_l}{\Delta S} \qquad (1)$$

Tracemos um diagrama em que marcamos em abcissas os valores de ΔS e em ordenadas os de $\frac{\Delta F}{\Delta S}$ (fig. 11).

Só tem pois sentido aplicar a noção de tensão quando se procura averiguar o que, em média, se passa em elementos de superfície suficientemente grandes em face das dimensões das partículas. Assim, no caso de uma barragem de enrocamento, com pedras de dimensões que atinjam, por exemplo, 50 cm, só se poderá falar em tensão quando nos refiramos a um elemento de superfície ΔS com dimensões de alguns metros quadrados; se se desejar ir abaixo destas dimensões terá de se considerar o